第 64 卷 第 3 期 天 文 学 报 Vol. 64 No. 3
2023 年 5 月 ACTA ASTRONOMICA SINICA May, 2023

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2023.03.013

基于PSP观测的行星际III型射电爆发的研究进展*

马 兵[1,2] 陈 玲[1,3†] 吴德金[1,3]

(1 中国科学院紫金山天文台 南京 210023)
(2 中国科学技术大学天文与空间科学学院 合肥 230026)
(3 中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

摘要 与太阳射电爆发相比, 通常认为频率较低的行星际射电爆发产生于远离低日冕的行星际空间. 地球电离层的截止导致地基设备无法对其进行观测. 美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)发射的帕克太阳探测器(Parker Solar Probe, PSP)是迄今为止距离太阳最近的空间探测器. 其搭载的射电频谱仪能够对10 kHz–19.17 MHz频段范围内的射电辐射进行观测. PSP能够靠近甚至可能穿越行星际III型射电爆发的辐射源区, 因此使用PSP对行星际射电爆发进行观测具有前所未有的优势. 简要介绍了目前为止使用PSP的射电观测数据对行星际III型射电爆发的多方面研究, 包括爆发的发生率、偏振、散射、截止频率、可能的辐射机制和相关的辐射源区等方面的研究进展, 并讨论了其未来的研究前景.

关键词 太阳: 活动, 太阳: 射电辐射, 太阳: 日冕, 太阳风

中图分类号: P182; **文献标识码**: A

1 引言

太阳III型射电爆发作为太阳活动所产生的最频繁和显著的射电辐射, 是日冕加速的高能电子束流沿着开放磁力线传播的典型迹象[1]. Wild等[2]完成了太阳射电爆发的早期观测并对爆发进行了分类. 他们把具有快速频率漂移特征并可能伴有基频谐频对结构的射电爆发称为III型射电爆发, 简称III型暴. 激发III型暴的电子束流的速度一般为0.1–0.5 c[3], 其中c为真空中的光速.

太阳III型射电爆发产生机制的模型主要有两种, 一种是Ginzburg等[4]提出的被广泛承认的等离子体辐射, 该理论认为电子束流经过尾瘤不稳定性的激发会在当地等离子体频率$f_{\rm p}$附近产生朗缪尔波. 而朗缪尔波经过与离子声波或反向传播的朗缪尔波的非线性波波相互作用, 就可以产生基频($f_{\rm p}$)或谐频($2f_{\rm p}$)的电磁辐射[5]. 尽管等离子体辐射可以解释III型暴的漂移、谐波和亮度等特征, 但是它仍然有许多缺陷和存在争议的问题[6]. 相比忽略了磁场作用的等离子体辐射, 另一种解释III型爆发产生的电子回旋脉泽辐射几乎于相同的时间被Twiss[7]和Schneider[8]提出. 电子回旋脉泽不稳定性在磁场较强($f_{\rm g}/f_{\rm p} \gg 1$)的等离子体环境中更容易被激发, 电磁波可以直接在电子回旋频率($f_{\rm g}$)及其谐频($2f_{\rm g}$)上被放大.

根据上述理论, 一般认为在太阳或日冕产生的射电爆发的频段在25–300 MHz左右(有些可高达几个GHz), 而更低频段的射电爆发被认为是传播到行星际空间的电子束流激发的, 所以将频率在0.01–

2022-09-29收到原稿, 2022-12-19收到修改稿

*国家自然科学基金项目(42174195、11873018、41531071、11790302、11761131007), 江苏省自然科学基金项目(BK20191513)资助

†clvslc214@pmo.ac.cn

10 MHz范围附近的III型暴称为行星际III型射电暴. 太阳射电爆发可以通过地面的射电望远镜进行观测, 但由于地球电离层的截止, 10 MHz以下的射电辐射无法被地面的望远镜观测到. 因此, 只能借助于空间卫星上搭载的低频射电探测设备来进行观测. 目前仍可进行低频射电观测的空间探测器有: WIND[9]、STEREO (Solar TErrestrial RElations Observatory)[10]、PSP(Parker Solar Probe)[11]和Solar Orbiter[12]等, 这些空间探测器都搭载了电场测量天线和射电频谱仪. 而PSP的最大优势是能进行抵近太阳的观测, 它将穿越太阳风加速的源区, 并将接近甚至可能穿越行星际III型暴的辐射源区, 这对深入研究行星际射电爆发的特征、源区的物理环境和辐射的产生机制都具有十分重要的意义.

本文介绍了目前为止使用PSP射电观测数据对行星际III型射电暴的观测及其相关的研究, 文章的结构如下: 第2节主要介绍了PSP的射电观测仪器、运行轨道和数据记录模式; 第3节介绍了使用PSP射电观测对行星际III型爆发的发生率、偏振、散射、截止频率、辐射机制及其相关的活动源区等方面的研究; 第4节是总结与研究展望.

2 仪器描述

帕克太阳探测器最初被称为太阳探测器+(Solar Probe Plus), 2017年5月改为以太阳风的预言者—芝加哥大学的尤金·帕克教授的名字命名. PSP发射于2018 年8月12日, 其主要科学目标是使用原位和遥感的观测来研究内日球层和日冕中发生的物理过程[11]. PSP上的FIELDS载荷为该任务提供了电场和磁场的测量.

如图1所示, FIELDS的电场传感器由4根安装在PSP热屏蔽罩边缘的2 m长的单极电场天线V1–V4和一根安装在尾部磁力计吊杆上的长21 cm的偶极天线V5组成. 这些传感器是FIELDS主要电子设备接收机的输入端. FIELDS的射电观测由射电频谱仪(Radio Frequency Spectrometer, RFS)[14]完成, 它包含一个双通道接收机和带宽为10.5 kHz–19.17 MHz的频谱仪. RFS通过两个子带宽接收机来处理数据产品, 它们分别是频段为10.5 kHz–1.7 MHz的低频接收器(Low Frequency Receiver, LFR)和频段为1.3–19.17 MHz高频接收机(High Frequency Receiver, HFR). RFS可以测量来自V1–V4天线前置放大器和搜索线圈磁强计(Search Coil Magnetometer, SCM)的一个轴的信号.

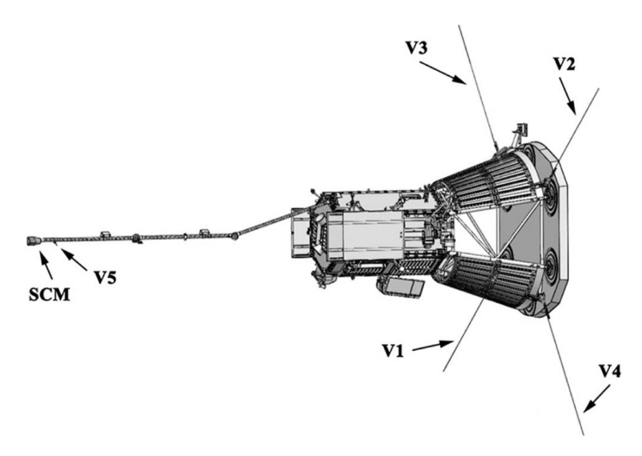


图 1 标注了FIELDS传感器的帕克太阳探测器的示意图. 图片来自文献[13].

Fig. 1 Schematic of the Solar Probe Plus spacecraft with FIELDS sensors indicated. This figure is from Ref. [13].

借助金星引力的助力, PSP将不断靠近太阳, 其轨道近日点的日心距离从前3个轨道的$\sim 35.7\ R_\odot$到2024年将逐渐减小到$\sim 9.86\ R_\odot$, 其中$R_\odot$表示太阳半径. PSP的每个轨道都分为相遇(encounter)和巡航(cruise)两个阶段. 当PSP的日心距离在0.25 AU (约54 $R_\odot$)以内时, 其处于相遇模式, 所有的仪器将会连续地观测并以高速率记录数据; 而当日心距离大于0.25 AU时, PSP处于巡航模式, 仪器将会由于功率限制和探测器本身的活动而处于间歇性工作的状态, 并以降低后的速率来记录数据[15]. RFS在相遇模式和巡航模式记录的射电频谱数据的时间分辨率分别为~7 s和~56 s. 目前可用的数据显示, 相遇模式和巡航模式的设定较为灵活, 并不完全以日心距离作为判断依据.

3 观测研究

3.1 内日球层观测的III型暴的统计和偏振研究

Pulupa等[15]利用RFS的自动谱通道0 (V1–V2)的数据对PSP前两轨相遇模式E01 (Encounter 01)和E02 (Encounter 02)观测的行星际射电III型

爆发进行了研究. 图2给出了两个相遇阶段对应的4.57 MHz上的功率谱密度曲线(a)和(d)以及HFR和LFR动态频谱(b)和(e)、(c)和(f)的概览, 颜色棒表示辐射在背景之上的分贝数(dB). 可以发现在E01阶段只有很少的几个弱的III型暴以及木星辐射被观测到; 而E02阶段则有大量的爆发发生, 并且在2019年的4月3日至4日爆发次数最多、辐射强度最大. SDO (Solar Dynamics Observatory)/AIA (Atmospheric Imaging Assembly)和STEREO/EUVI (Extreme UltraViolet Imager)的图像也可以找到与E02期间观测到的射电辐射相对应的活动, 它们可能都起源于卡林顿经度~ 300°的NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)活动区12738.

在几百kHz的频率上, LFR谱主要包含了散粒噪声(shot noise)和准热噪声(quasi-thermal noise, QTN)[16]等探测器当地的信号. 在90–150 kHz的QTN特征就是等离子体峰或者等离子体线, 它使得RFS可以精确地测量f_p并进一步得到总的电子密度. LFR谱上也可以看到低频的波, 如接近f_g的低频波(10–30 kHz)[17]和接近f_p的大振幅静电朗缪尔波. 与Krupar等[18]对在1 AU处观测的结果类似的是, PSP频谱分析的一个例子显示出射电辐射的峰值强度出现在~1 MHz.

PSP日心距离的变化范围较大, 图2的标注显示PSP在E01和E02的日心距离约从近日点的$R_0 = 35.7\ R_\odot$到较远的54 $R_\odot$, 辐射强度的测量将会受此影响. 因此, 该研究使用的辐射强度是经过距离缩放因子$(R/R_0)^2$调整后的结果, 其中R为日心距离. RFS谱中单个爆发的识别是通过找给定频率(4.57 MHz)上的最大值来实现的, 并且设定了缩放后的最低辐射强度为$I_{\min} = 10^{-16}\ \mathrm{V^2\cdot Hz^{-1}}$, 低于此强度的最大值将被排除以减少噪声的干扰.

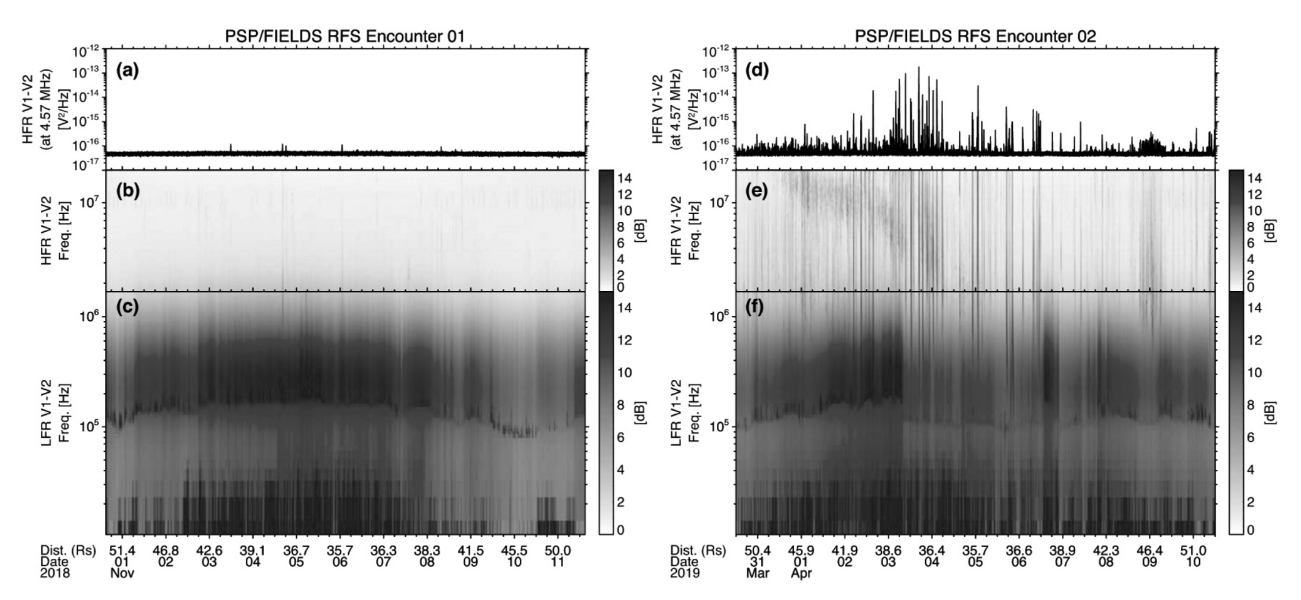


图 2 PSP中RFS的观测在E01和E02期间的对比. 图片来自文献[15].

Fig. 2 Comparison of RFS observations from PSP during E01 and E02. This figure is from Ref. [15].

图3展示了使用上述方法得到的爆发发生率的统计结果, 其中从上至下的3行分别代表大于不同径向缩放Stokes I强度的累积爆发数目N、大于不同等待时间Δt的N和不同频率上的幂律谱指数α, 第2行中的λ为对应时段爆发的发生率; 由左至右3列分别代表图中标注的3个不同的统计时间段统计的大于$I_{\min}$的420、104和107个III型爆发的统计结果. 使用Wheatland[19]的方法根据强度分布函数计算出的大于不同辐射强度的累积分布曲线对应α的结果显示3个阶段的幂律指数分别为1.64±

0.03、1.49±0.05和1.92±0.09. 其中第3阶段噪暴期间的幂律指数与Eastwood等[20]在5.035 MHz观测到的谱指数2.10 ± 0.05是一致的, 而在非噪暴期间观测的更陡峭的谱指数也与Fitzenreiter等[21]发现的1.69的谱指数基本吻合. 另一方面, III型噪暴期间的累积等待时间的分布结果与简单泊松过程对应的等待时间模型曲线符合得很好, 然而E02期间的等待时间分布显示出了更多的结构, 它们对应了明显不同活动的时间间隔. 噪暴期间的谱指数变化也更为陡峭(1.8–8 MHz为: α ~1.6–1.9), 相遇模式阶段的谱指数则相对平缓(1.8–8 MHz为: α ~1.6–1.7). 谱指数随频率的变化可能是由于卫星和活动区的相对位置、辐射在传播过程中的折射和散射所造成的, 方向性模式的多点测量和大量爆发间隔的研究将有助于理解谱指数α随频率的变化规律和研究其产生的原因.

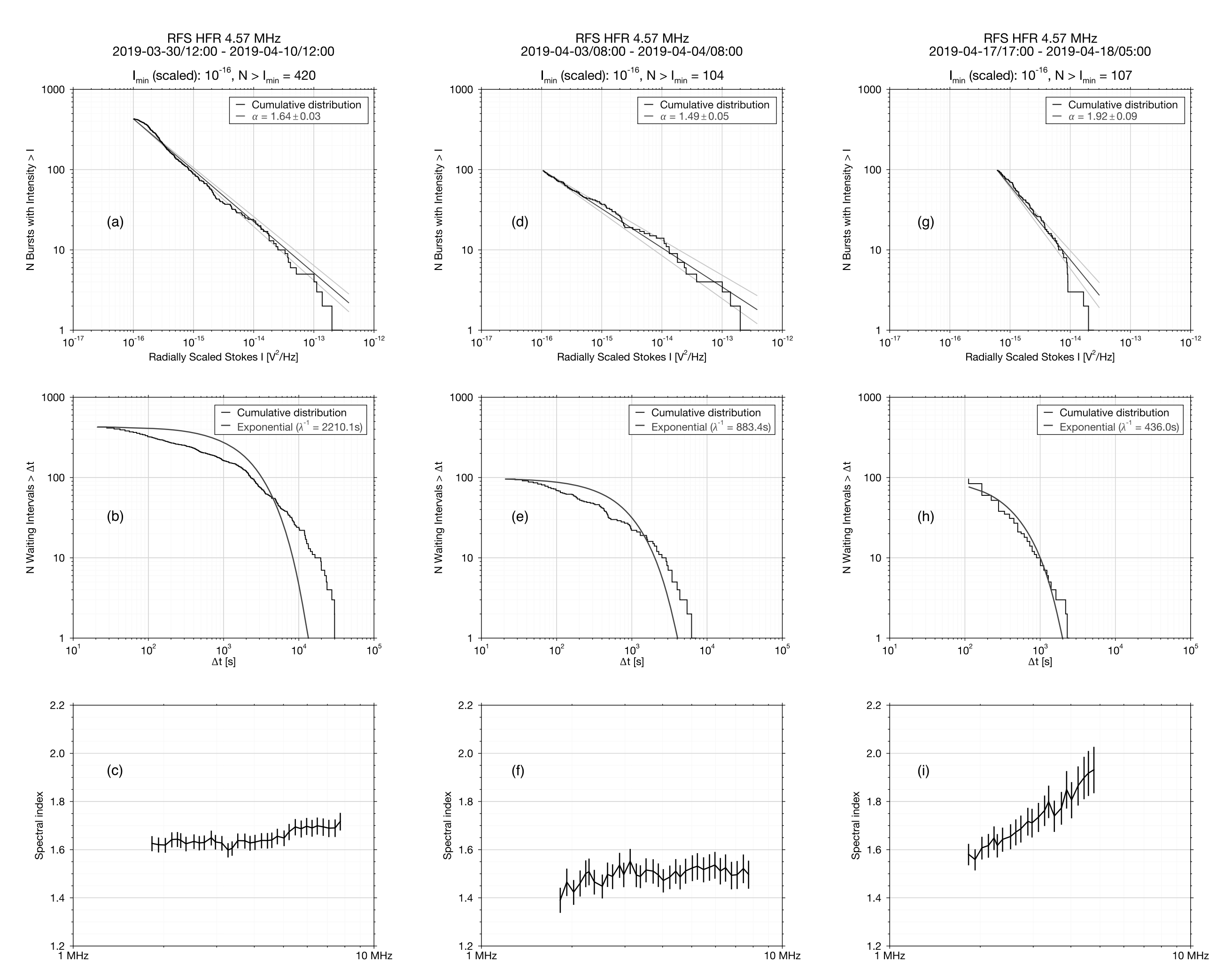


图 3 PSP在整个E02阶段(左边一列)、爆发活动最强的24 h(中间一列)和E02之后出现III型噪暴的时段(右边一列)观测的III型爆发的发生率统计结果. 图片来自文献[15].

Fig. 3 Statistics of type III radio burst occurrence during the whole PSP E02 (the left column), the 24 hours for the most intense burst activity (the middle column) and a post-encounter interval showing a type III storm (the right column). This figure is from Ref. [15].

PSP偏振观测所使用的Stokes I、Q、U、V分量的计算表达式分别如下:

$$I = V_{12}V_{12}^* + V_{34}V_{34}^*\,, \tag{1}$$

$$Q = V_{12}V_{12}^* - V_{34}V_{34}^*\,, \tag{2}$$

$$U = V_{12}V_{34}^* + (V_{12}V_{34}^*)^*\,, \tag{3}$$

$$iV = V_{12}V_{34}^* - (V_{12}V_{34}^*)^*\,, \tag{4}$$

其中$V_{12}V_{12}^*$和$V_{34}V_{34}^*$分别为V1–V2和V3–V4通道的RFS自动谱数据, $V_{12}V_{34}^*$为RFS的交叉谱数据. 通过计算Stokes V和I参量的比值V/I, Pulupa等[15]实现了相对圆偏振的简单估计. 而由于法拉第旋转的影响, 线偏振(Stokes Q和U)是不可能实现遥感观测的. PSP观测的III型爆发偏振的几个例子如图4所示, 图中展示了Stokes I强度和代表相对圆偏振的V/I比值的观测. 结果显示只有几个爆发的前沿在6 MHz以上出现了明显的右手螺旋(right-hand circular, RHC)偏振特征(图中表示负值的蓝色部分). 在E02阶段观测到较为明显的7个具有类似图中特征的爆发事件, 其他大量的时间都只有微弱的难以辨别的偏振信号.

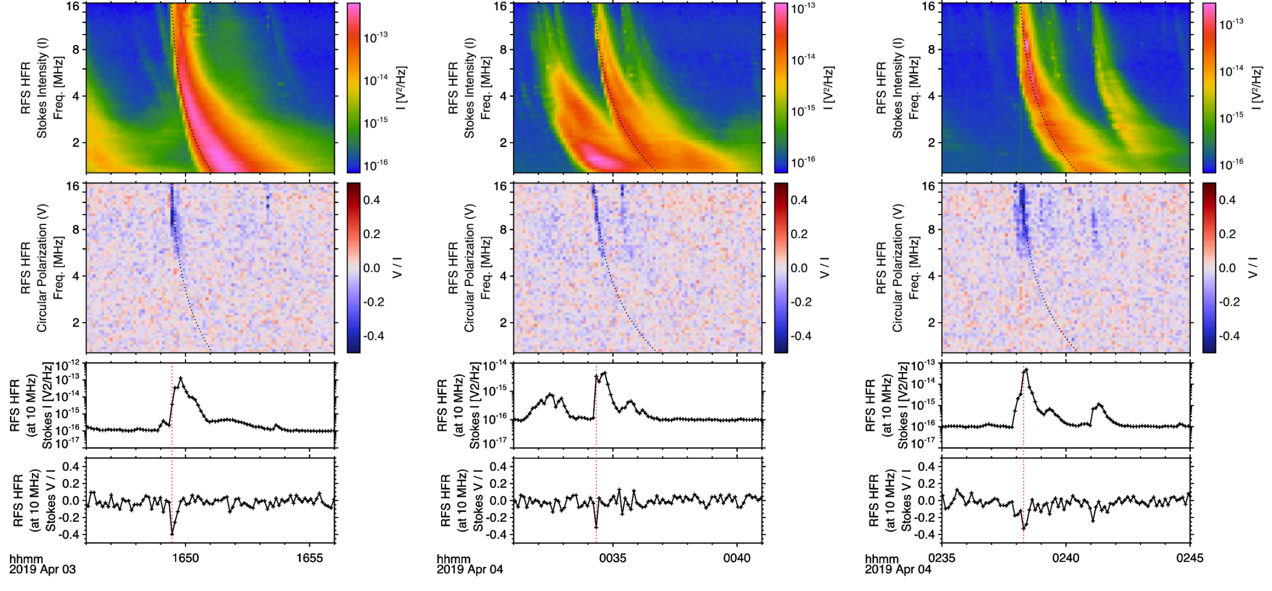


图 4 约6 MHz以上显示出圆偏振的几个射电暴的示例图. 图片来自文献[15].

Fig. 4 Example radio bursts displaying circular polarization above ~6 MHz. This figure is from Ref. [15].

前面提及的4月中旬发生的持续时间约为1 d的III型噪暴是RFS在巡航模式所观测到的, 其时间分辨率为~56 s, 其中部分时段的偏振展示在图5中. 与相遇模式观测的各个活动阶段不同的是, 在整个爆发阶段观测到的几乎每个噪暴都表现出非常明显的圆偏振, 而且绝大部分都是右手螺旋偏振. 此外, 平均偏振度从1 MHz的约−0.1到5 MHz的约−0.2 (5 MHz以上的时间分辨率不足以清楚地区分单个爆发).

按照图4中标注的虚线取值得到相遇模式的7个偏振较强事件的Stokes I (强度)和V/I (相对圆偏振)的轮廓曲线显示在图6中. 这些事件的强度与Krupar等[18]在1 AU的观测结果较为一致. 尽管它们都是振幅较大的事件, 但观测到的很多大振幅事件并没有伴随明显的圆偏振特征, 而且, 如此少的事件也无法进行强度和偏振度相关性的定量分析.

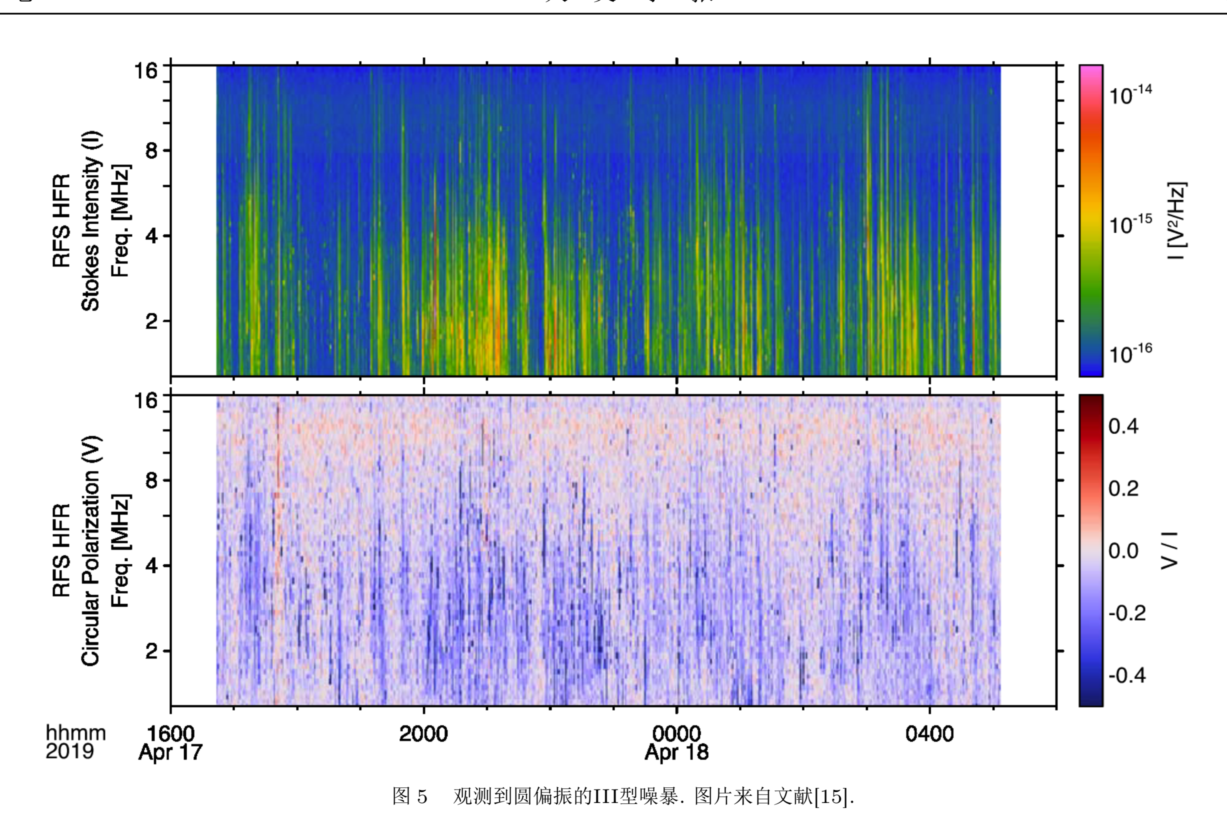


图 5 观测到圆偏振的III型噪暴. 图片来自文献[15].

Fig. 5 Type III storm with circular polarization. This figure is from Ref. [15].

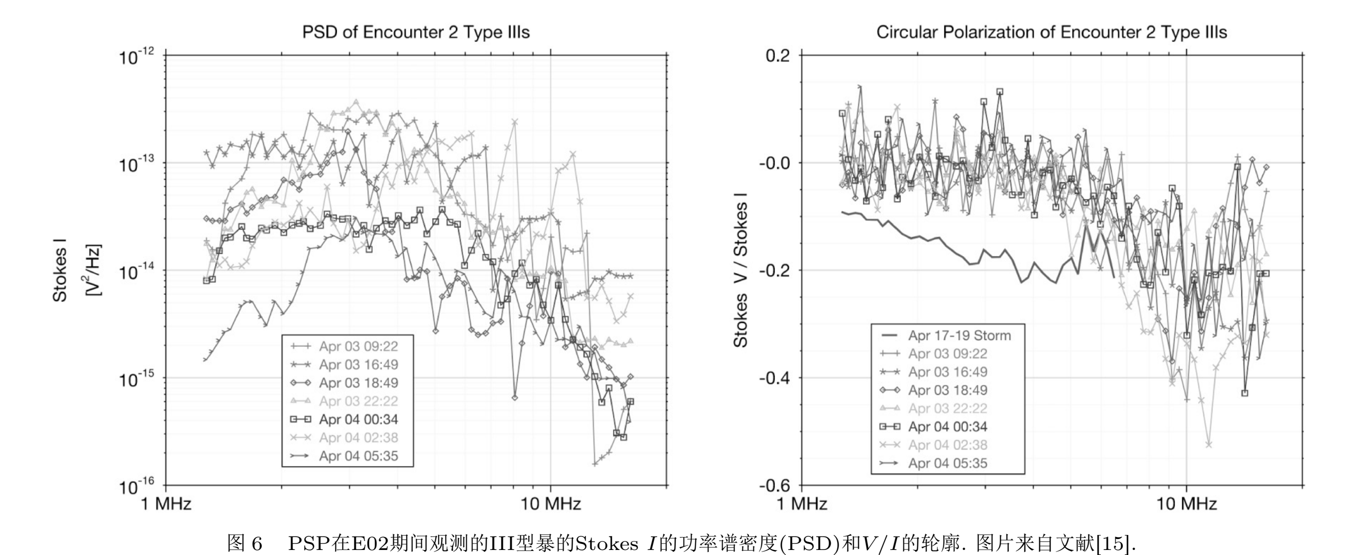


图 6 PSP在E02期间观测的III型暴的Stokes I的功率谱密度(PSD)和V/I的轮廓. 图片来自文献[15].

Fig. 6 The PSD of Stokes I and V/I profiles of type III radio bursts observed during PSP E02. This figure is from Ref. [15].

这些事件在8–12 MHz的偏振明显高于4 MHz以下, 显示出了部分圆偏振的特征, 这与Dulk等[22]对高频的观测较为一致. 另一方面, 它们的圆偏振V/I的数值与Dulk等[22]的研究中基频部分的较为一致, 但比谐频部分的数值更高, 因此这些圆偏振的成份很可能是来自于基频辐射而不是谐频辐射. 他们认为部分圆偏振既可能是100%的O模辐射消偏振导致的, 也可能是最初产生的辐射就包含了O模和X模两种成分.

3.2 基于PSP观测III型暴的太阳风密度扰动研究

射电波在太阳风中会经过很强的散射, 因此其表面源似乎比实际源大很多并且有所偏移. 而由于散射会依赖于密度湍动谱, 所以对射电波传播的详细分析可以为相对的密度扰动$\epsilon = \langle\delta n\rangle/\langle n\rangle$提供间接的信息, 其中$\langle\delta n\rangle$为密度变化的平均幅度, $\langle n\rangle$为密度的平均值. Krupar等[23]对比了STEREO卫星观测的III型暴在125 kHz和1 MHz之间的衰减时间和蒙特卡洛模拟的结果, 并提出III型暴典型的指数衰减轮廓完全可以通过源和观测者之间基频辐射的散射解释.

Krupar等[24]分析了PSP在第2轨近日点附近(E02期间)观测到的30个III型射电爆发. 他们首先统计了III型暴在1–10 MHz之间各个频率上的衰减时间τ_d, 如图7所示, 图中的"+"号表示功率谱密度(V_r^2)的观测值, 倾斜虚线为衰减部分的拟合线, 左右两竖直虚线分别标注了峰值时间和衰减到中位数的时间, 所以衰减时间τ_d就是两竖直虚线之间的时间差. 图8展示了PSP和STEREO观测的III型暴衰减时间的中位数与频率之间的统计关系, 其中黑色和灰色圆点分别为STEREO和PSP的统计结果, 上下两侧的细虚线为25%–75%的误差范围, 中间的黑色较粗虚线为两组数据的幂律拟合结果. PSP观测的幂律指数在1 MHz与STEREO的结果相比具有显著的偏差, 他们发现1 MHz射电暴产生的高度与预期的太阳风变为超阿尔文状态的阿尔文点的高度接近, 并提出谱指数的差异可能是阿尔文点两侧不同的等离子体环境导致的.

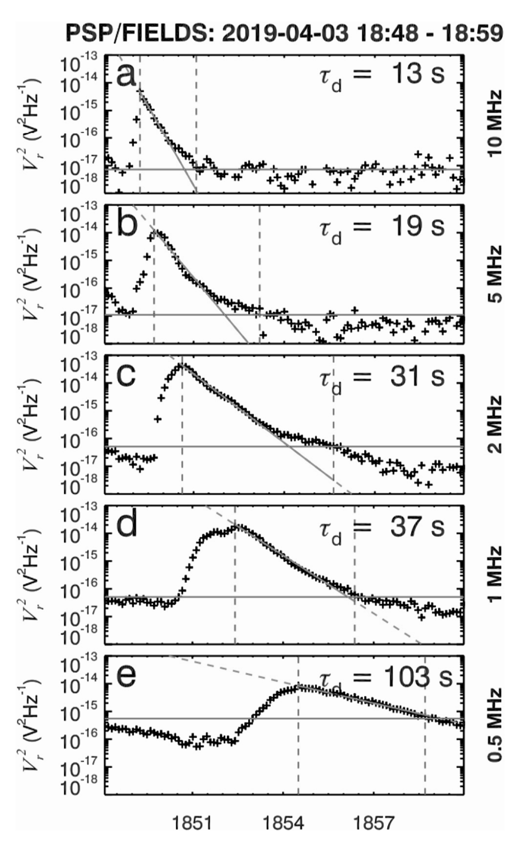


图 7 2019年4月3日的射电III型暴的测量. 图片来自文献[24].

Fig. 7 Radio measurements of the April 3 2019 type III burst. This figure is from Ref. [24].

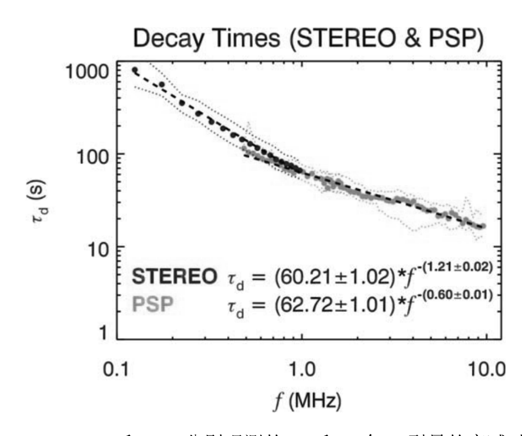


图 8 STEREO和PSP分别观测的152和30个III型暴的衰减时间的分布. 图片来自文献[24].

Fig. 8 Distributions of decay time of 152 and 30 type III radio bursts for STEREO and PSP. This figure is from Ref. [24].

Thejappa等[25]开发了蒙特卡洛模拟的代码，可用于研究散射和折射在各项同性源产生行星际射电辐射的传播过程中的作用. Krupar等[24]修改了Thejappa等[25]的蒙特卡洛技术用于模拟射电辐射传播到PSP的到达时间$t_{\rm MC}$. 模拟结果(如图9所示)显示随着ϵ的增强$t_{\rm MC}$也逐渐延长. 将上述蒙特卡洛模拟的$t_{\rm MC}$与PSP观测的$\tau_{\rm d}$做对比(如图10所示)，即可反映PSP观测爆发相对应的密度扰动水平. 图10 (a)中黑色虚线为图8中PSP观测的幂律拟合线，不同颜色的彩色线条代表不同ϵ时$t_{\rm MC}$随辐射频率的变化，图10 (b)显示了图10 (a)中黑虚线和彩色线条相交位置的ϵ随辐射频率的变化. Krupar等[24]据此预测了径向距离为2.5–14 $R_\odot$范围内在有效湍流尺度下相对ϵ的范围为0.22–0.09.

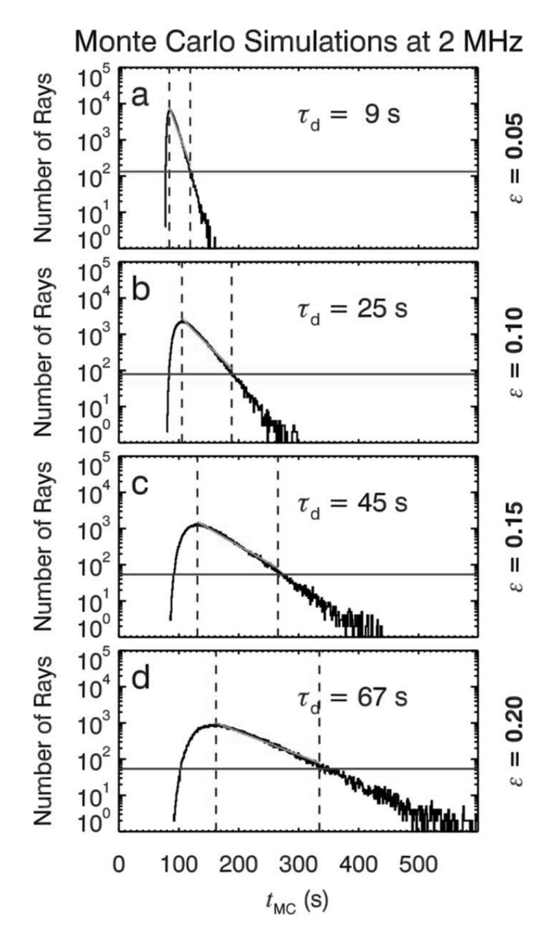


图 9 在2 MHz上的蒙特卡洛模拟结果. 图片来自文献[24].

Fig. 9 Results of Monte Carlo simulations at 2 MHz. This figure is from Ref. [24].

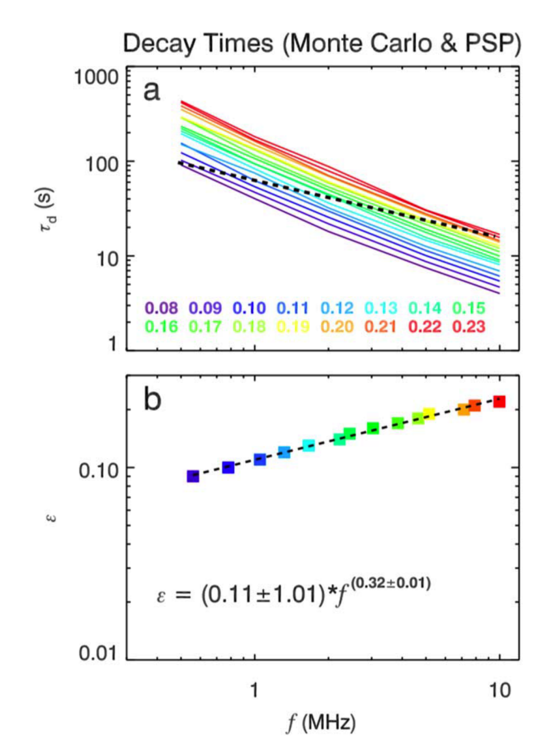


图 10 蒙特卡洛模拟和PSP观测的衰减时间$\tau_{\rm d}$的对比. 图片来自文献[24].

Fig. 10 Comparison of dacay times $\tau_{\rm d}$ between Monte Carlo simulations and PSP observations. This figure is from Ref. [24].

最后，他们还计算了PSP在径向距离为35.7 $R_\odot$处实地测量的相对ϵ，结果显示在第1轨和第2轨近日点的ϵ分别为0.07和0.06，这与之前根据STEREO遥测此径向距离上的射电源所预测的结果(ϵ范围为0.06–0.07)非常符合.

3.3 PSP观测的行星际III型暴的截止频率的统计研究

Wu等[26]总结了行星际III型射电暴的3个明显的特征：辐射在低频的突然截止、较低的起始频率和截止频率附近较长的持续时间. Leblanc等[27]在1995年就使用Ulysses卫星对行星际III型射电暴的低频截止频率$f_{\rm lo}$进行了统计分析，结果发现在Ulysses卫星与黄道面相对位置相差较大的4个不同位置、日心距离范围在1.1–4.3 AU范围内，III型暴辐射截止频率的分布几乎不变，分布的峰值频率约为100 kHz，而作为比较的$f_{\rm p}$分布则随着卫星位置

的变化而变化.

Dulk等[28]在1996年对WIND和Ulysses同时观测到的III型暴进行了类似的统计, 结果发现截止频率分布的峰值频率仍然在100 kHz附近, 不随着卫星观测位置的变化而变化. 针对这样的结果, 他们提出了截止是由辐射机制本身所导致的, 而辐射的方向性和传播效应对观测到的截止频率也会有所影响.

为了探究PSP在内日球层观测到的III型暴的截止频率是否仍然具有不变的分布特征, Ma等[29]使用PSP前5个轨道相遇模式(E01–E05)的观测数据对期间发生的III型爆发进行了自动识别和手动筛选, 最终得到了176个事件, 其$f_{\rm lo}$和卫星当地$f_{\rm p}$的概率分布如图11所示. 其中$f_{\rm p}$主要分布在50–250 kHz, 峰值频率为100 kHz, 显著高于Leblanc等[27]和Dulk等[28]的结果. 这与他们的统计结果和推测是一致的, 也就是说卫星当地等离子体频率会随卫星所在位置的变化而变化. 而$f_{\rm lo}$的主要分布在0.2–1.6 MHz, 其中峰值频率为约700 kHz, 明显高于Leblanc等[27]和Dulk等[28]对截止频率的统计结果, 而且与他们发现的截止频率不随位置变化的规律不一致. 考虑到PSP距离太阳很近时, 当地$f_{\rm p}$已经明显高于前人在1 AU以外观测$f_{\rm lo}$的峰值频率(100 kHz), 当地等离子体频率的截止可能使得III型暴的截止频率下限不会低于100 kHz, 但其不可能使$f_{\rm lo}$的峰值频率延伸到高达700 kHz附近.

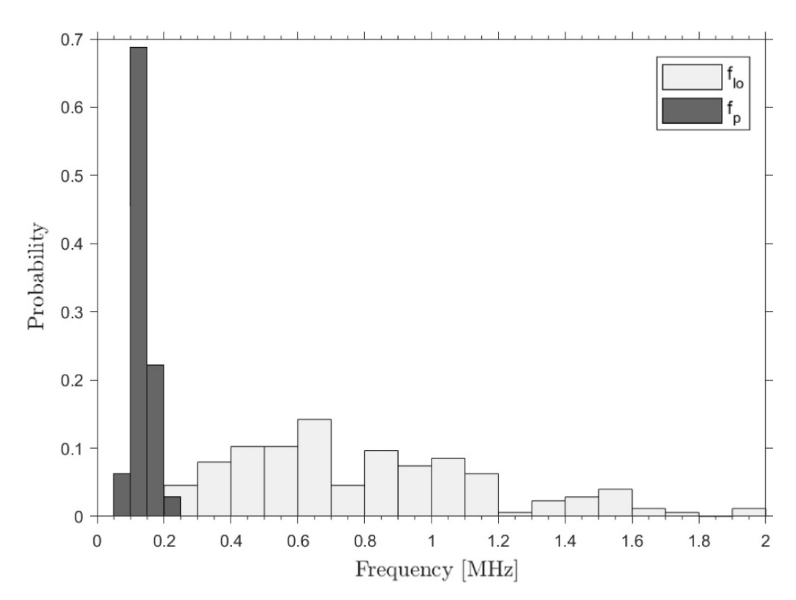


图 11 截止频率$f_{\rm lo}$和PSP当地的等离子体频率$f_{\rm p}$的概率分布直方图. 图片来自文献[29].

Fig. 11 The histogram of normalized probability of the cutoff frequency $f_{\rm lo}$ and the PSP's in situ plasma frequency $f_{\rm p}$. This figure is from Ref. [29].

对于上述结果的差异, Ma等[29]简要地讨论了3种可能的原因: (1)太阳活动强度的影响: Leblanc等[27]和Dulk等[28]统计的时段为1990—1995年, 接近太阳活动极大年; 而Ma等[29]的统计时段为2018—2020年, 几乎全部处于太阳活动的极小年. 太阳活动强度会影响磁能的释放和激发射电辐射的高能电子束流的传播距离, 进而影响了观测到的爆发截止频率的分布. (2)事件选择标准的影响: Ma等[29]统计的事件中包含许多持续时间为2–3 min、辐射强度较弱的事件; 而Leblanc等[27]和Dulk等[28]则只选取了在24 h视图中较为明显的事件, 不同的事件选择标准可能会导致统计结果的差异. (3)辐射衰减效应的影响: Ma等[29]选择的事件只选取了PSP在相遇模式($R < 0.25$ AU)的观测事件, 而Leblanc等[27]和Dulk等[28]则使用的是1–4.3 AU的观测数据. 辐射衰减可能会导致许

多较弱爆发的辐射强度在较远的探测器位置减小到背景噪声水平. Leblanc等[30]对不同强度爆发的截止频率的统计结果如图12所示, 可以发现相对于强爆发, 弱爆发一般具有较高的截止频率, 因而辐射衰减所导致的识别到的爆发的强度分布的差异可能会影响截止频率的分布.

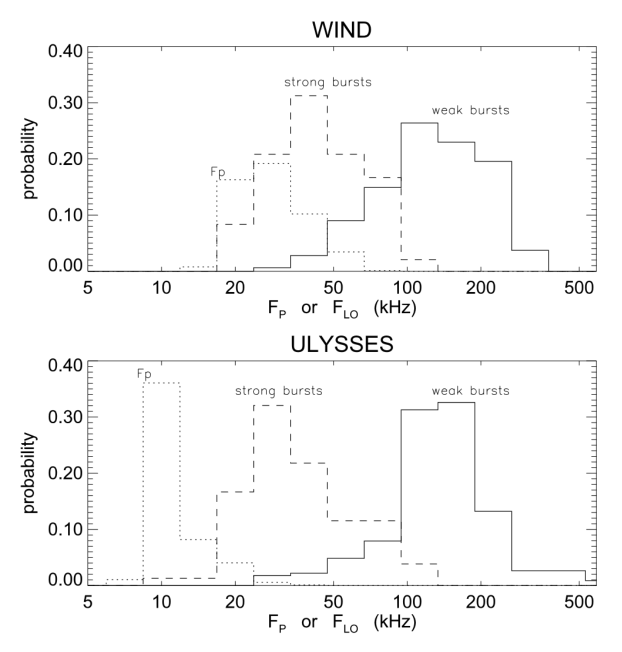
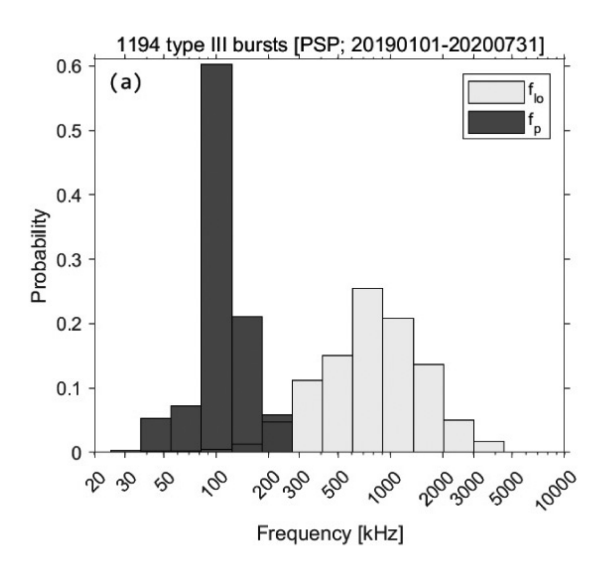


图 12 显示了截止频率显著依赖于爆发强度而不依赖于卫星当地等离子体频率的f_p和f_{lo}的分布直方图. 其中弱爆发、强爆发的截止频率和当地等离子体频率分别被标注为实线、虚线和点线. 图片来自文献[30].

Fig. 12 Histograms of f_p and f_{lo} showing how the low frequency cutoffs are strongly affected by burst intensity but are essentially independent of the value of f_p at the spacecraft. The cutoff frequency of weak and strong bursts and the local plasma frequency are marked by solid line, dashed line and dotted line, respectively. This figure is from Ref. [30].

针对PSP观测的III型暴截止频率显著更高的情况, Ma等[31]首次对PSP和WIND同一时段观测的爆发进行了统计, 他们选取了太阳活动强度较低的从2019年1月1日到2020年7月31日的所有时间段的观测数据, 并对这两个卫星的数据使用了相同的Canny边缘识别的图像处理方法对爆发事件和截止频率等进行识别并手动筛选了爆发事件. 如图13所示, WIND的观测结果仍然与Leblanc等[27]和Dulk等[28]的结果类似, 截止频率f_{lo}分布的峰值频率为100 kHz; 而PSP的观测结果与Ma等[29]的结果也基本一致, 截止频率的峰值仍在700 kHz附近. 该结果基本排除了太阳活动强度和事件选择标准的影响.



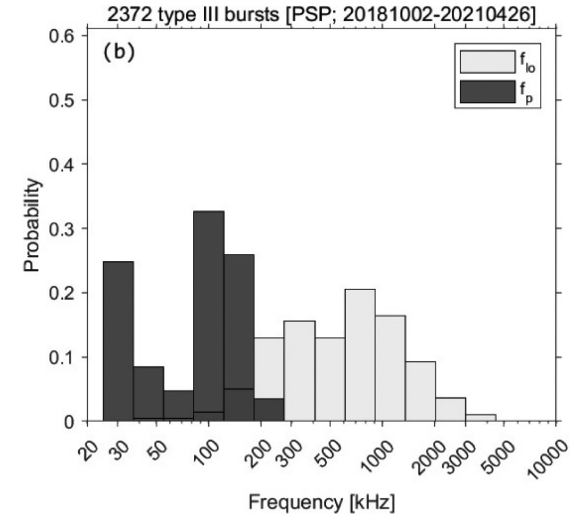


图 13 WIND和PSP在2019年1月1日到2020年7月31日期间观测的III型暴的特征频率(f_{lo}和f_p)的分布直方图. 图片来自文献[31].

Fig. 13 The histogram of the characteristic frequency (f_{lo} and f_p) of type III bursts observed by WIND and PSP from January 1 2019 to July 31 2020. This figure is from Ref. [31].

为了进一步研究辐射衰减效应、排除辐射方向性的影响, Ma等[31]还对比了PSP和WIND的最

小方位角差$\Delta\theta$小于30°情况下, PSP在近日点附近(图14中点划线之下黑色方块标注的部分)与WIND观测到III型暴事件的数量. 发现PSP和WIND观测到的事件数分别为212和18, 这个结果表明, 辐射衰减导致了在1 AU处的WIND无法观测到大量的弱爆发.

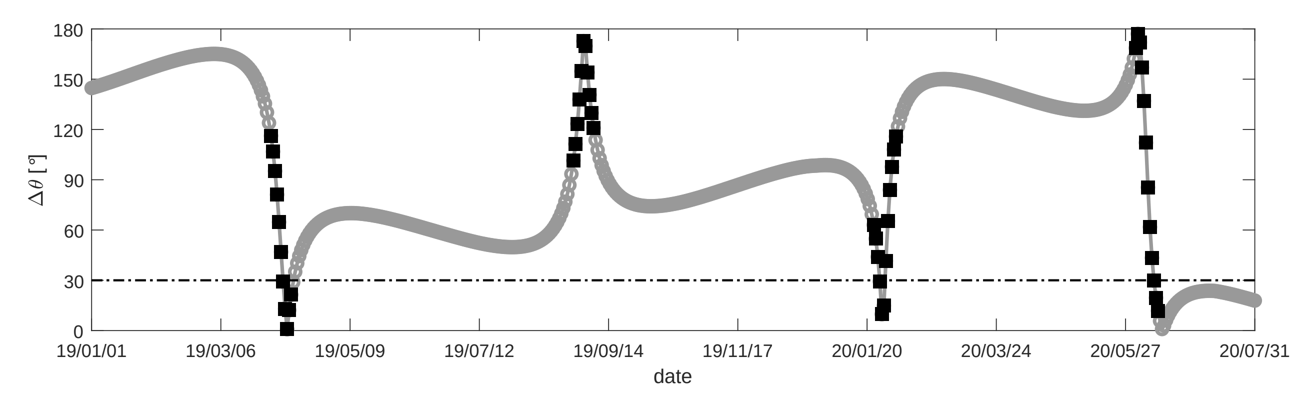


图 14 WIND和PSP在HGI坐标系下的最小方位角差$\Delta\theta$. 灰色圆圈标记的曲线显示了该时期内每天的最小方位角差. 黑色的方块标记了PSP在相遇模式的日期. 点划线显示了$\Delta\theta = 30°$的位置. 图片来自文献[31].

Fig. 14 The minimum azimuth difference $\Delta\theta$ between WIND and PSP in the HGI coordinate. The curve marked by the grey circles shows the minimum azimuth difference for each day during this period. Black squares label the dates when PSP is in the encounter phases. The dot-dashed line represents the position where $\Delta\theta = 30°$. This figure is from Ref. [31].

此外, 如图15所示, Ma等[31]还给出了在$\Delta\theta <$ 30°的视角下, PSP分别在近日点和远日点处观测(图(c)、(d))与WIND观测(图(e)、(f))的射电动态频谱图的对比, 图(a)、(b)分别为PSP在近日点和远日点附近观测时PSP (叉号)、WIND或地球(空心圆)在HGI (heliographic inertial)柱坐标系中与太阳(黑色实心圆)的位置, 其中R为以AU为单位径向距离, θ为以°为单位的方位角. 可以发现, PSP在近日点能观测到的许多弱爆发都无法被WIND观测到, 而当PSP在远日点附近时, 则几乎所有的事件都可以被同时观测到. 这一结果更直观地展示了辐射衰减的影响: 在1 AU和更远的距离, 许多具有较高截止频率的弱爆发无法被观测到, 导致了统计的爆发截止频率主要分布在100 kHz附近, 显著低于PSP在近处观测到的700 kHz的结果.

3.4 一个行星际IIIb型射电暴及其可能的辐射机制研究

具有条纹状精细结构的IIIb型射电暴是一种频谱上类似于III型暴的具有快速频率漂移特征的爆发活动, Ellis等[32–33]以及de la Noë等[34]在早期发现并报道了此类爆发事件. Chen等[35]研究了欧洲低频射电阵(LOw Frequency ARray, LOFAR)观测到的IIIb-III型成对的射电暴, 如图16所示, 图(a)为该事件的动态频谱图, 其中左侧箭头标注的F和H分别是基频和谐频成分, 图(b)、(c)分别为谐频和基频的局部放大图, 图中颜色棒表示的是以sfu为单位的流量. 从图中可以发现, 基频和谐频分支都具有精细结构, 其中基频分支由约70个条纹组成, 而且许多条纹是相互重叠的. Zhang等[36]也使用LOFAR的观测对另一个IIIb-III型爆发的射电源的大小及其运动进行了详细的研究.

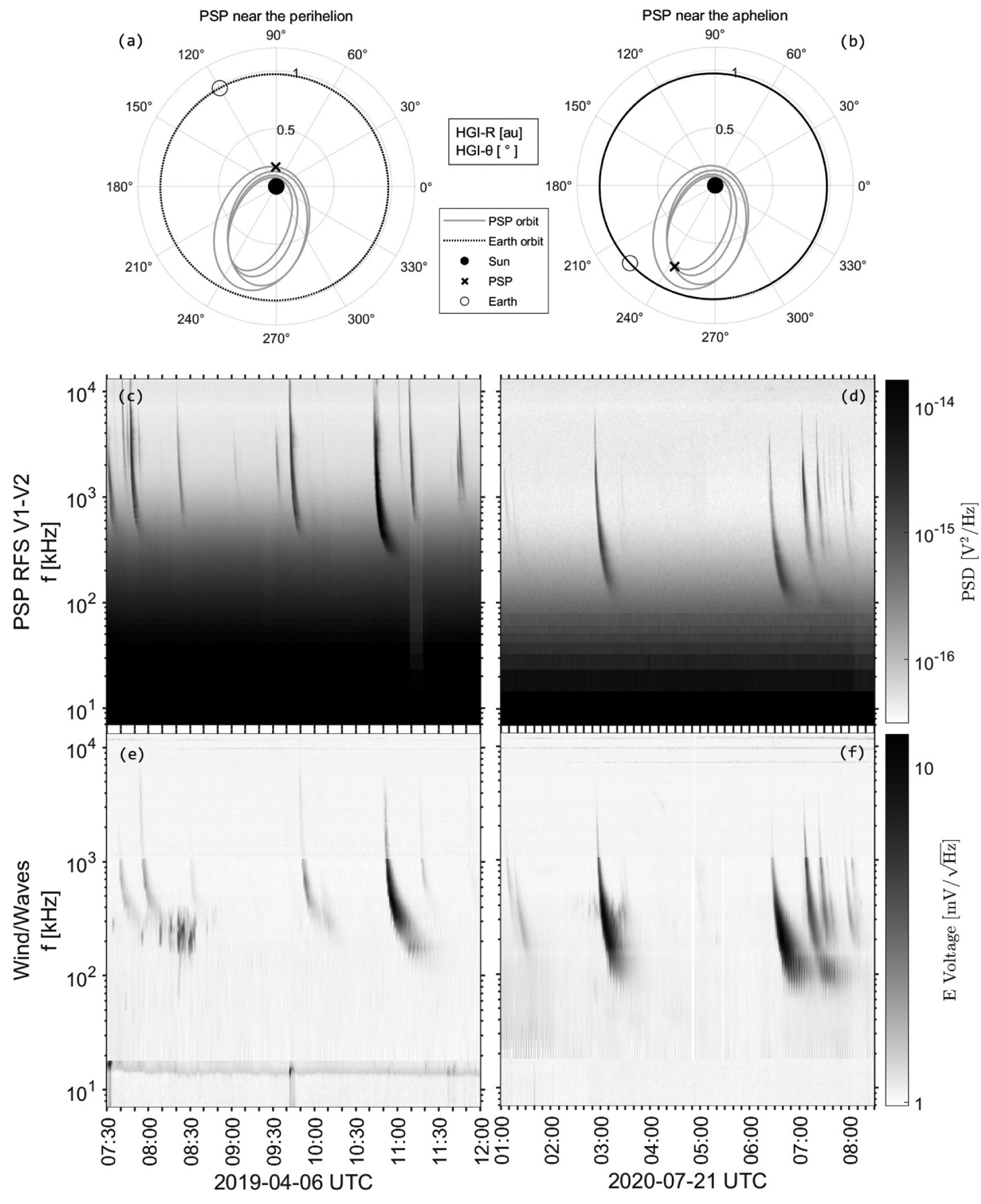


图 15 在PSP接近近日点和远日点这两种情况并且最小方位角差$\Delta\theta < 30°$时PSP和WIND的观测对比图. 图片来自文献[31].

Fig. 15 Comparison of observations by PSP and WIND when the minimum azimuth difference $\Delta\theta < 30°$ in the two cases of PSP near orbital perihelion and aphelion. This figure is from Ref. [31].

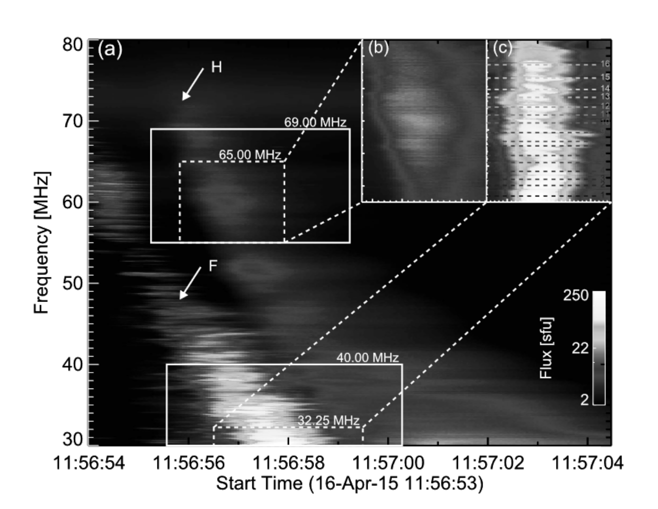


图 16 LOFAR在2015年4月16日观测到的频率范围在30–80 MHz的IIIb-III型爆发对的动态频谱图. 图片来自文献[35].

Fig. 16 The dynamic spectrum of a type IIIb-type III burst pair in the frequency range of 30–80 MHz observed by LOFAR on April 16 2015. This figure is from Ref. [35].

IIIb型射电爆发的产生机制已经有许多作者讨论过. 考虑到太阳风电子密度的调制, 基于等离子体辐射的密度不均匀性、密度湍动和调制不稳定性被陆续提出[35, 37–38]; 而在电子回旋脉泽辐射的基础上, Wang[39]提出IIIb型精细结构可能由与固定/慢传波有关的密度或磁场的空间结构对电子回旋脉泽不稳定性进行调制而产生的. Zhao等[40]则提出阿尔文波(Alfvén Wave, AW)可以对电子回旋脉泽进行调制从而产生条纹结构, 并以此解释了许多IIIb型射电爆发的形成.

尽管米波段的爆发精细结构的研究较为广泛, 但关于行星际低频IIIb型射电爆发的研究却非常少. Chen等[41]就对Pulupa等[15]报道的PSP观测的一个典型的行星际IIIb型暴的辐射机制进行了研究. 如图17所示, 图(a)给出了PSP观测该IIIb型爆发的原始动态频谱, 图(b)为去除噪声后的动态频谱, 图(c)中显示了每个频率上辐射的峰值强度. 这个爆发由22个条纹所组成, 其辐射的频率范围约为0.8–19 MHz. 各个频率上功率谱时间轮廓的高斯拟合结果显示, 该事件在高、低频段的持续时间分别约为40和80 s, 平均持续时间约为60 s.

行星际III型暴的产生离不开沿开放磁力线传播的快电子束, 但具体的激发机制则尚无定论. 事实上, 激发机制依赖于辐射源区的等离子体参数, 即电子等离子体频率和回旋频率的比值f_{pe}/f_{ce}. 等离子体辐射和电子回旋脉泽辐射则分别在f_{pe}/f_{ce}大于1和小于1时才容易发生. 而该事件的频率范围远高于PSP当地等离子体频率和回旋频率说明其辐射源区更加接近太阳. Chen等[41]利用Wu等[42]提出的经验模型和PSP实地观测的数据拟合出更加准确的电子密度和磁场的径向分布模型. 图18显示了模型在1–10 $R_\odot$的变化曲线及其对应的特征频率和频率比, 其中R/R_S为以太阳半径为单位归一化的日心距离. PSP观测到的这个爆发的辐射频率处于频率比f_{pe}/f_{ce}小于1的范围内, 这暗示了电子回旋脉泽辐射起到了重要的作用.

考虑到阿尔文波在日冕和太阳风中存在的普遍性[6, 43–45], Chen等[41]引入了两支单色波来描述阿尔文波的扰动, 并使用Chen等[45]提出的基于电子回旋脉泽辐射的O1模生长率计算公式和月牙型分布的电子速度分布函数进行计算, 得到生长率的计算结果如图19所示, 其中图(a)为不同频率上的最大生长率的分布情况, 可以看到其产生了具有周期性强度变化的条纹状结构; 图(b)为利用电子束流运动的一系列典型参数计算并绘制的具有条纹特征的动态频谱图, 这一结果与PSP观测到的IIIb型射电暴(图17)符合得很好.

3.5 PSP观测III型暴相关的活动区研究

3.5.1 与PSP观测III型暴相关联的活动区的周期性研究

日冕中跨越多个波段的周期性活动经常被报道, 相关周期约为5 min, 与太阳的p模相当, 这暗示了太阳光球和日冕之间的耦合. Cattell等[46]首次报道了PSP观测的周期性III型暴(如图20所示). 他们使用了SDO卫星的极紫外观测、白光观测和磁场图像以及核光谱望远镜阵列(Nuclear Spectroscopic Telescope Array, NuSTAR)的太阳耀斑X射线观测与PSP进行联合观测对2019年4月12日的周期性III型暴进行了分析, 并使用了多种评估周期性的方法来对比验证获得的周期.

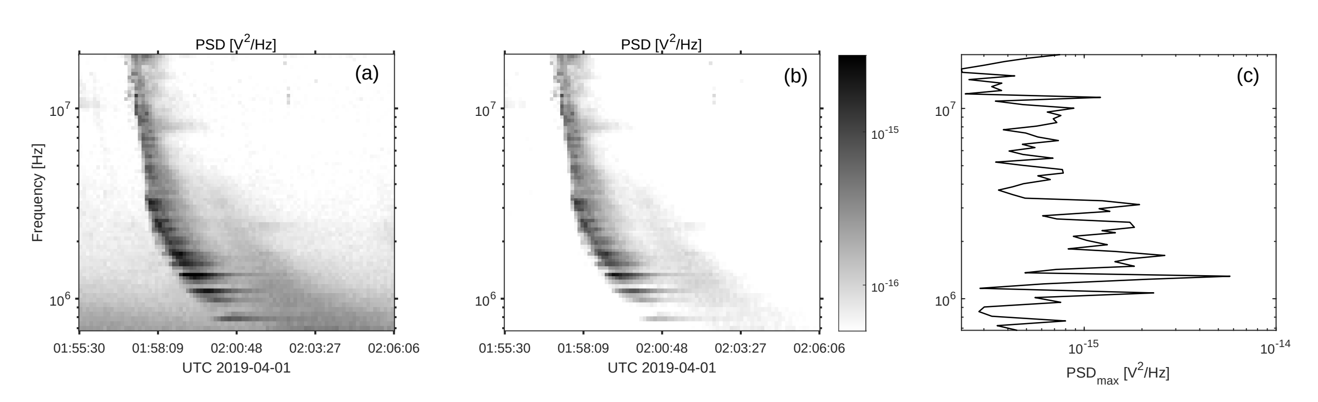


图 17 2019年4月1日PSP观测到的行星际(IP) IIIb型射电爆发. 原始数据和去噪声数据的动态频谱图分别显示在图(a)和图(b)中, 图(c)显示了射电辐射每个频率上的峰值强度. 图片来自文献[41].

Fig. 17 IP type IIIb radio burst observed by PSP on 2019 April 1. The dynamic spectrum of original data and the denoised data are shown in panels (a) and (b), respectively. Panel (c) shows the peak intensity of radio radiation at each frequency. This figure is from Ref. [41].

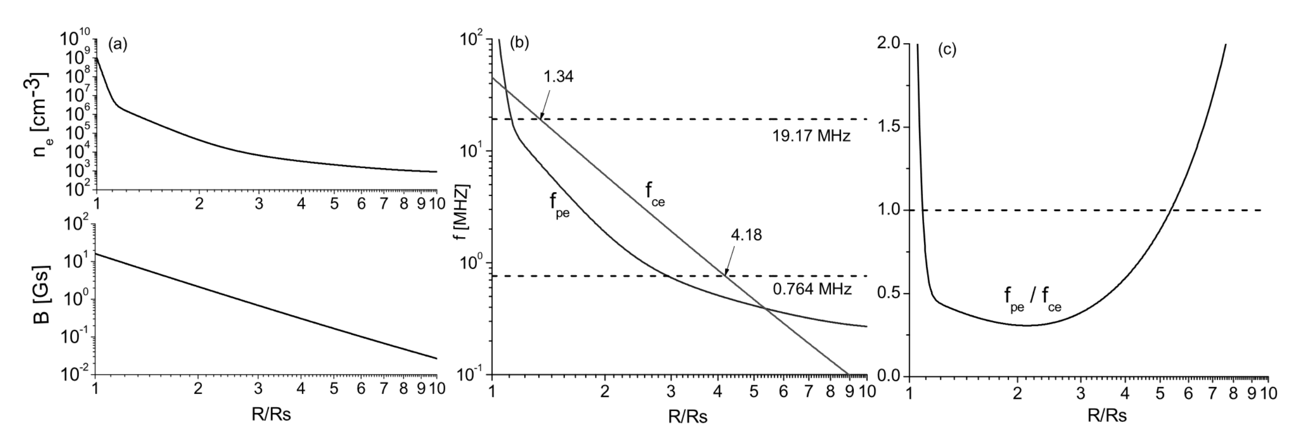


图 18 太阳大气的密度n_e和沿开放磁力线区域磁场B的经验模型及其对应的特征频率(f_pe和f_ce)和频率比($f_\mathrm{pe}/f_\mathrm{ce}$). 图片来自文献[41].

Fig. 18 The empirical model of solar atmospheric density n_e and magnetic field B along an open magnetic field region and corresponding characteristic frequencies (f_pe and f_ce) and their ratio ($f_\mathrm{pe}/f_\mathrm{ce}$). This figure is from Ref. [41].

结果显示: 在一个活动区的几个区域中, 极紫外频段约5 min的周期性与PSP和WIND观测到的III型射电暴的重复率有很好的相关性. 下降的211和171 Å的光变曲线在多个区域显示出了周期性的轮廓, 并且171 Å的峰有时会晚于211 Å的峰出现. 这暗示了脉冲事件能够导致低日冕中的加热和随后的降温. NuSTAR的X射线观测发现在III型暴期间至少有一个微耀斑存在, 但并没有与III型暴一一对应的X射线观测. 该研究为在X射线和极紫外数据中没有观测到耀斑时的周期性非热电子加速提供了证据. 他们认为加速过程一定与小的周期性事件(可能是纳耀斑)相关.

3.5.2 PSP在E02期间观测的III型噪暴的源活动区

前文3.1小节中提到Pulupa等[15]在PSP的E02期间观测到了由大量的小III型暴所组成的III型噪暴, 并提出其可能由当时存在的较大的活动区12738所加速的高能电子激发的. 然而, Harra等[47]则详细分析了当时存在的另一个较小的活动区12737, 并认为这些III型噪暴更有可能是该活动区加速的电子束所激发产生的.

图21展示了这段噪暴的概览, 爆发从2019年3月31日开始, 一直持续到4月6日. GOES的软X射

线曲线显示该时段内没有耀斑爆发的迹象. 爆发的强度峰值频率随着时间逐渐减小, 这暗示了爆发源区域的密度在逐渐减小或爆发源逐渐膨胀. 图22为SDO/AIA在193 Å观测的活动区12737随时间演化的图像, 此图表明该活动区在噪暴期间发生了明显的膨胀.

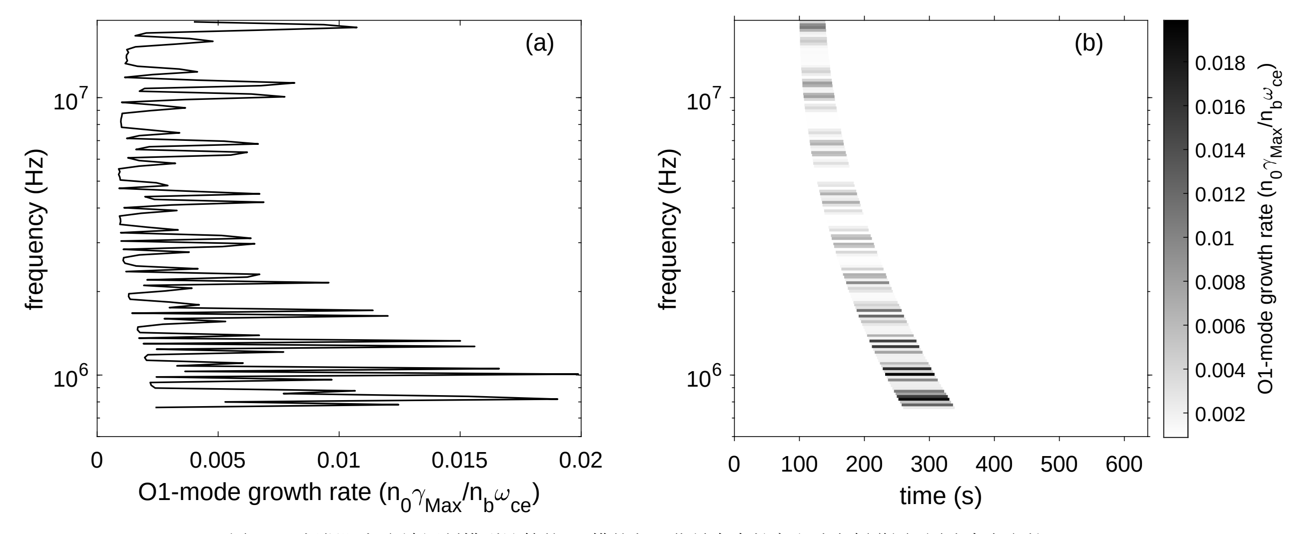


图 19 根据阿尔文波调制模型计算的O1模的归一化最大生长率和动态频谱图. 图片来自文献[41].

Fig. 19 The normalized maximal growth rate of the O1 mode and the dynamic spectrum calculated by the AWs modulation model. This figure is from Ref. [41].

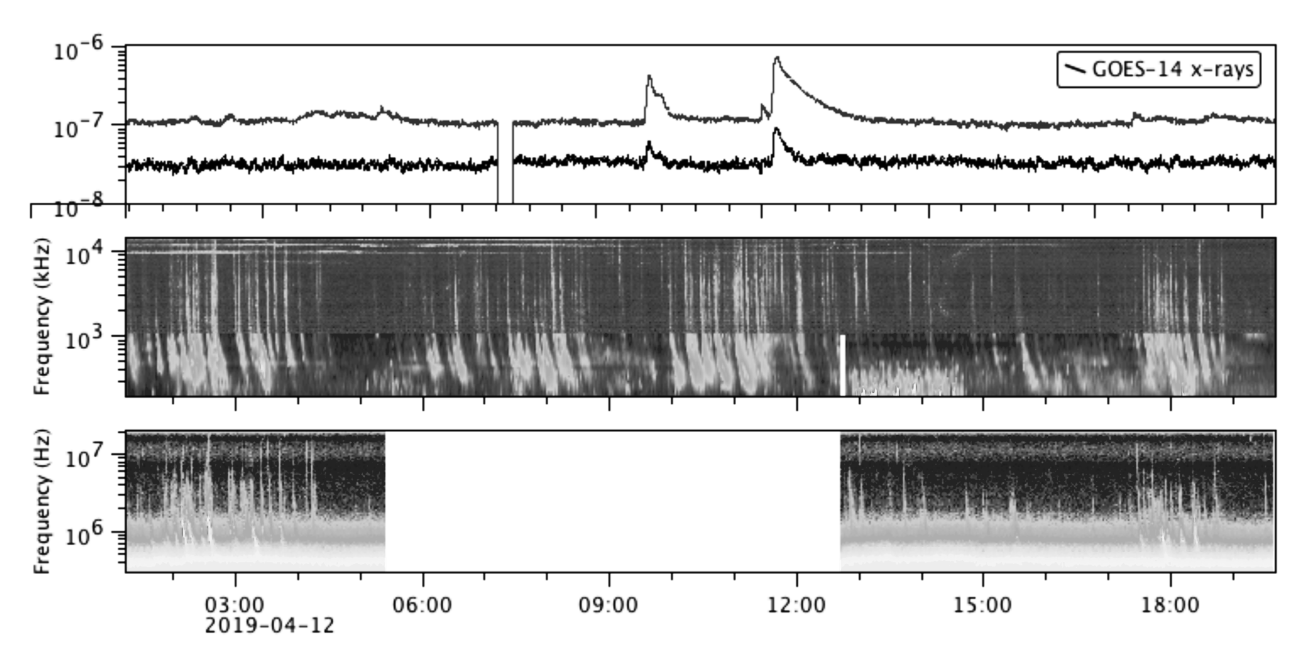


图 20 2019年4月12日1:00至20:00 UT观测的GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite)-14的X射线(上)、WIND(中)和PSP观测的III型暴(300 kHz至20 MHz, 下)的概览图. 图片来自文献[46].

Fig. 20 Overview of X-rays observed by GOES-14 (top), Type III radio bursts (300 kHz to 20 MHz) observed by WIND (middle) and Parker Solar Probe (bottom) for April 12 2019 1:00 to 20:00 UT. This figure is from Ref. [46].

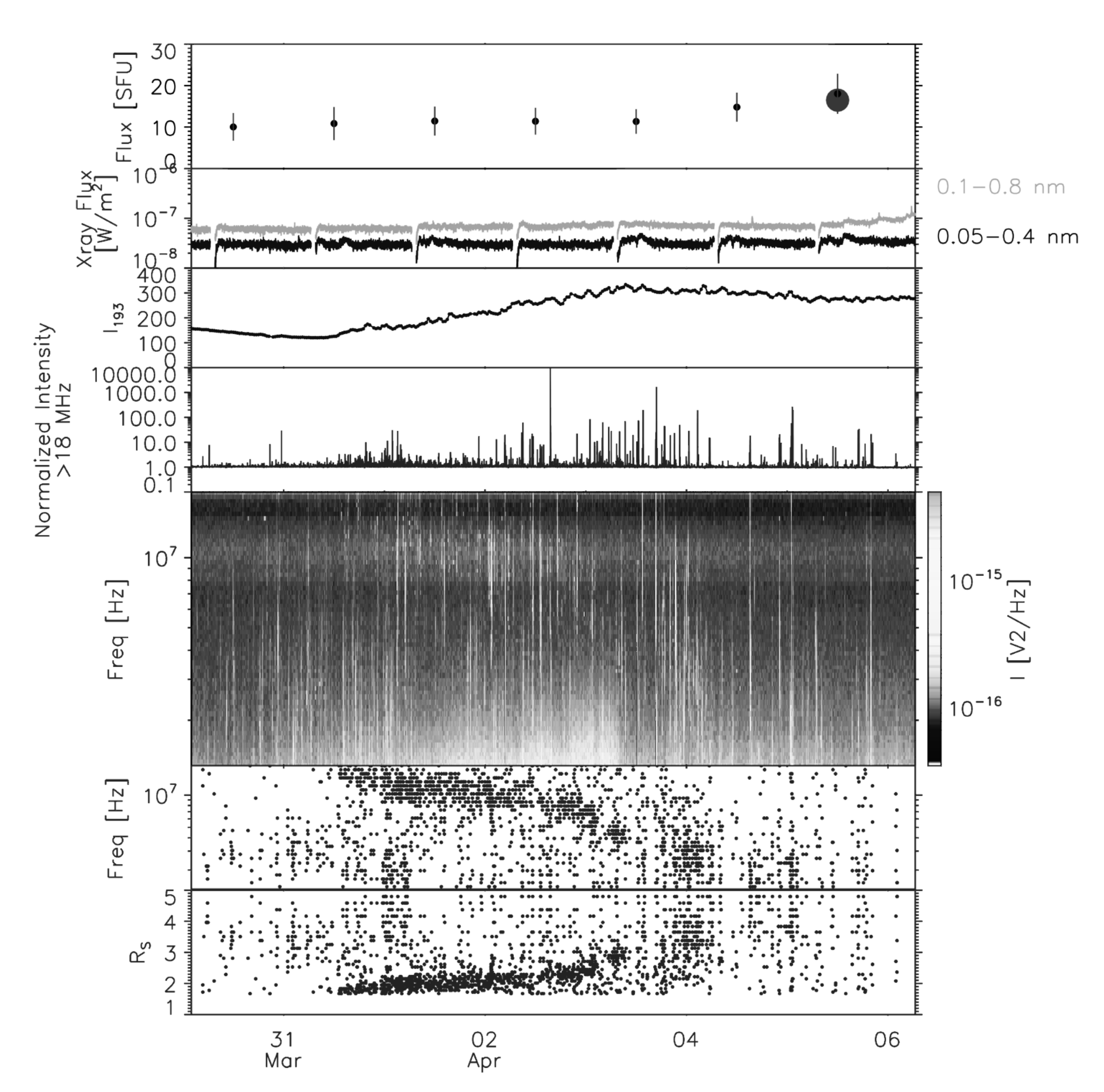


图 21 2019年3月30日到4月6日的时间段内使用PSP/RFS, RSTN (Radio Solar Telescope Network)和MWA (Murchison Widefield Array)的射电频段观测以及AIA的193 Å的强度和GOES的X射线观测概览图. 从上到下的7个图分别为RSTN在245 MHz观测的流量, GOES软X射线流量, AIA的193 Å强度, 18 MHz以上的归一化斯托克斯强度, PSP观测的完整的频谱图, 归一化信号的峰值频率和预测的射电辐射源的高度. 图片来自文献[47].

Fig. 21 PSP/RFS, RSTN, and MWA radio frequency measurements, AIA 193 Å intensity, and GOES X-ray data over the full interval from March 30 to April 6 2019. The seven panels from top to bottom are RSTN flux at 245 MHz, GOES soft X-ray flux, AIA 193 Å intensity, normalized Stokes intensity above 18 MHz, the full spectrogram observed by PSP, the peak frequency of normalized signal and inferred source height of the radio emission, respectively. This figure is from Ref. [47].

Harra等[47]还使用了不同的线性无力场(linear-force-free field, LFFF)模型计算了日冕磁场分布, 并构建了全局的日冕结构图. 如图23所示, 从4月1日到4月4日, EIS观测的活动区边缘的多普勒蓝移区域磁场明显变得更加开放. 图24展示了EIS观测到Fe II 195.119 Å的强度、多普勒速度和非热粒子速度的演化过程, 可以明显看到活动区东侧的蓝移区域在明显变大, 高速运动的非热粒子也明显变多. 这与AIA的成像和外推的磁场结构一致, 等离子体可以通过这一出流区域加速逃逸到太阳风中.

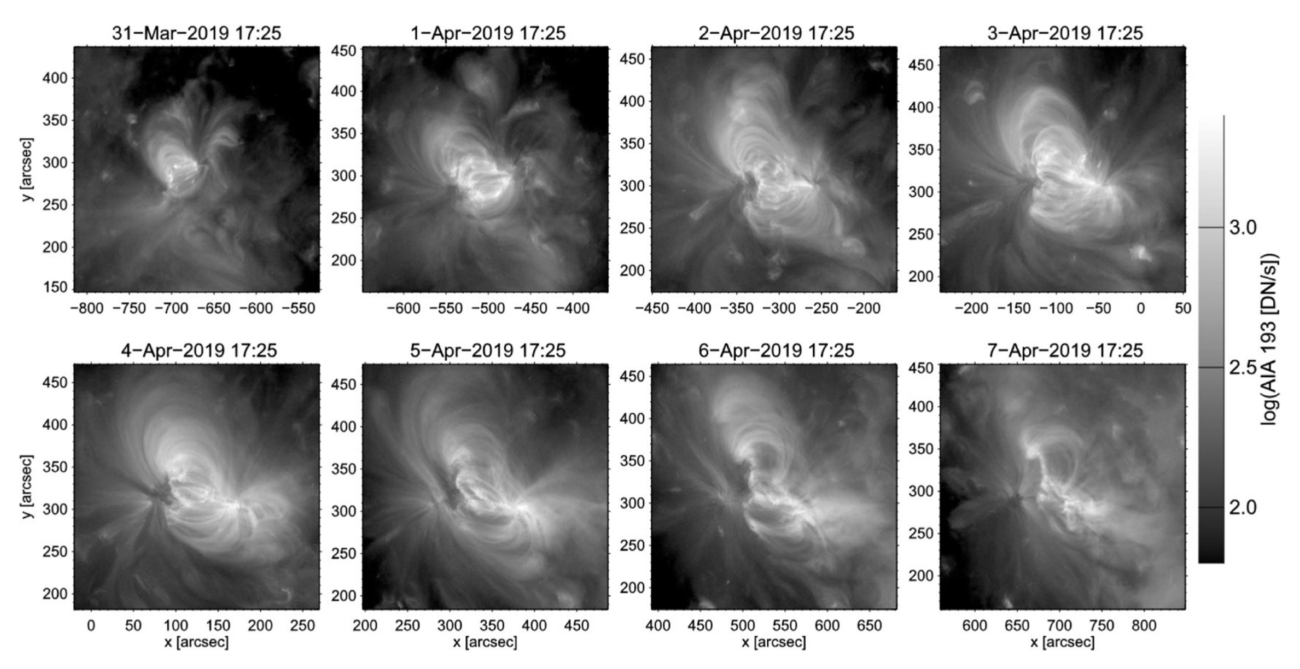


图 22 2019年3月31日出现的活动区到2019年4月7日的演化过程. 图片来自文献[47].

Fig. 22 Evolution of the active region from its emergence on March 31 to April 7 2019. This figure is from Ref. [47].

第1电离势(first ionisation potential, FIP)偏差水平在一定程度上能够反映太阳能量粒子(solar energetic particle, SEP)的活动[48], 出流区域的FIP偏差在此期间有明显的增强, 并在4月4日达到峰值. 这暗示了太阳能量粒子活动也在增强. Harra等[47]也探索了出流区域的动力学, 但其在观测时间分辨率尺度上没有显示出湍动, 他们认为这可能是观测时间分辨率较低所导致的.

尽管没有明显的耀斑产生, 活动区12737的演化过程却与PSP观测到的III型噪暴在时间上十分吻合, 这表明它是引起射电噪暴的电子束流源, 而且这些束流最可能起源于活动区边缘的强蓝移等离子体区域.

3.5.3 PSP探测到与太阳背面活动区相关的太阳射电暴

Stanislavsky等[49]对PSP在2020年6月5日观测到的日面边缘后侧活动区产生的几个太阳射电爆发进行了研究. 6月3日新产生的活动区NOAA 12765在5日演化出一个偶极的太阳黑子, 并且其区域大小已经达到130 MH, 其中MH为可见太阳半球的百万分之一. 他们认为这种尺度的活动区能够产生高密度的电子束, 并且激发伴有III型爆发的U型暴. 该活动区在PSP、STEREO A和地球方向的WIND观测的位置如图25所示, 图中显示该活动区位于PSP视角的日面后侧.

他们使用了位于乌克兰哈尔科夫的GURT (Giant Ukrainian Radio Telescope)阵列进行了地基观测, 该阵列观测的频率范围为8–80 MHz, 时间分辨率为100 ms, 频率分辨率为38.147 kHz. GURT望远镜在6月5日的9点33分至38分内观测到了4组爆发, 图26 (a)、(b)分别展示了GURT和PSP对这4组爆发观测的动态频谱, 其中前3组是较弱的III型暴, 而第4组包含了较强的U型暴和J型暴, 还伴有III型暴. 对应的PSP观测到的爆发比GURT观测到的爆发早了几分钟的时间, 但由于PSP射电观测具有相对较低的时间和频率分辨率, 不能分辨出每一组爆发中更多的细节.

Stanislavsky等[49]认为U+J+III型爆发可能产生于活动区AR 12765附近的高密度等离子体环, 并以此为假设提出了一种改进的日冕密度模型. 图27 (a)、(b)分别为球对称密度模型和改进的活动区日冕密度模型对射电辐射传播影响的示意图. 他们认

为, 如果日冕密度是球对称分布的, 则该活动区产生的III型暴则会由于附近的高密度等离子体的截止所屏蔽, 从而无法被位于日面背后的PSP观测到; 而如果日冕密度在不同角度上分布具有差异, 即在活动区附近等离子体密度更高, 则观测到的相应频段爆发的源区应该在相对更高的位置, 射电辐射就可以穿过宁静太阳部分的低密度等离子体传播, 从而能够被位于日面后侧的PSP观测到.

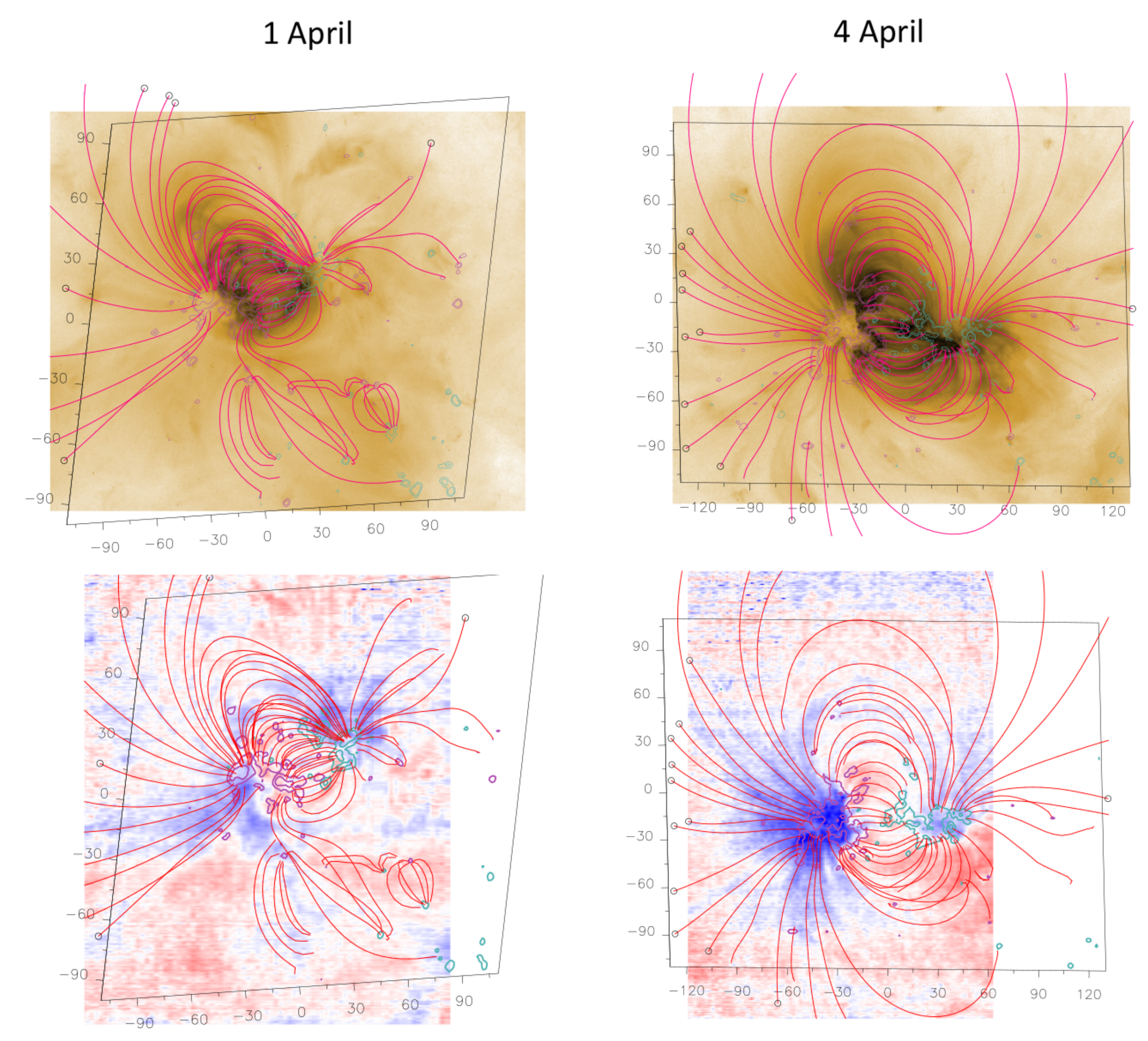


图 23 4月1日和4月4日的活动区磁场模型. 上面两张图显示了叠加在AIA 193 Å观测图像上的磁场模型. 下面两张图是叠加在EIS (Hinode EUV Imaging Spectrometer)多普勒速度图上的相同的磁场模型. 图片来自文献[47].

Fig. 23 Magnetic field model of the active region on April 1 and April 4. The top two panels show the magnetic field model overlaid on the images observed by AIA 193 Å. The bottom two panels show the same magnetic field model overlaid on the Doppler velocity maps by EIS. This figure is from Ref. [47].

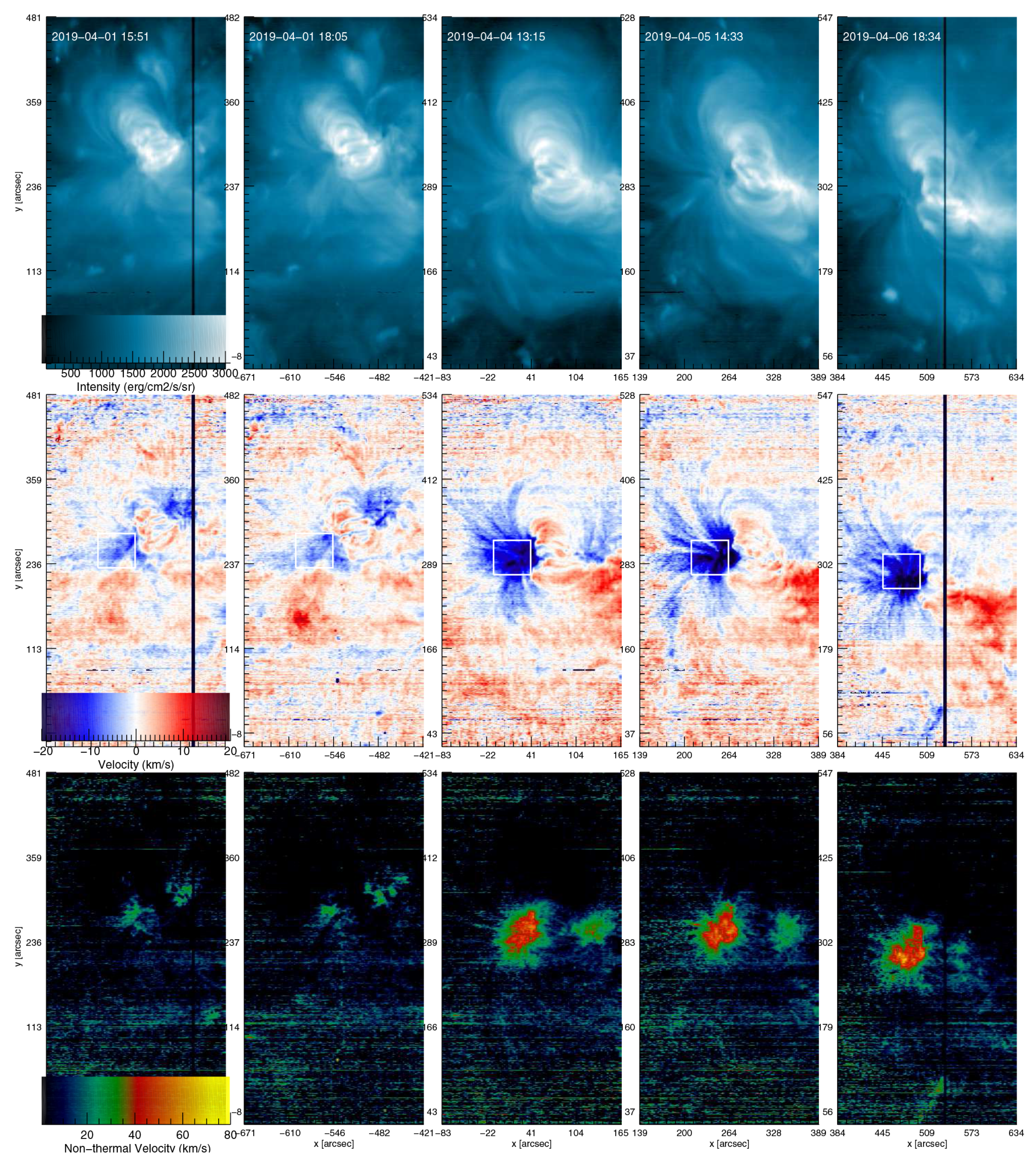


图 24　使用EIS的Fe XII 195.119 Å线观测的活动区从4月1日到6日穿越日面过程中的强度(上面一行), 多普勒速度(中间一行)和非热速度(下面一行)图. 图片来自文献[47].

Fig. 24　EIS Fe XII 195.119 Å intensity (top row), Doppler velocity (middle row) and non-thermal velocity (bottom row) maps of the active region as it crossed the disc from April 1 to 6. This figure is from Ref. [47].

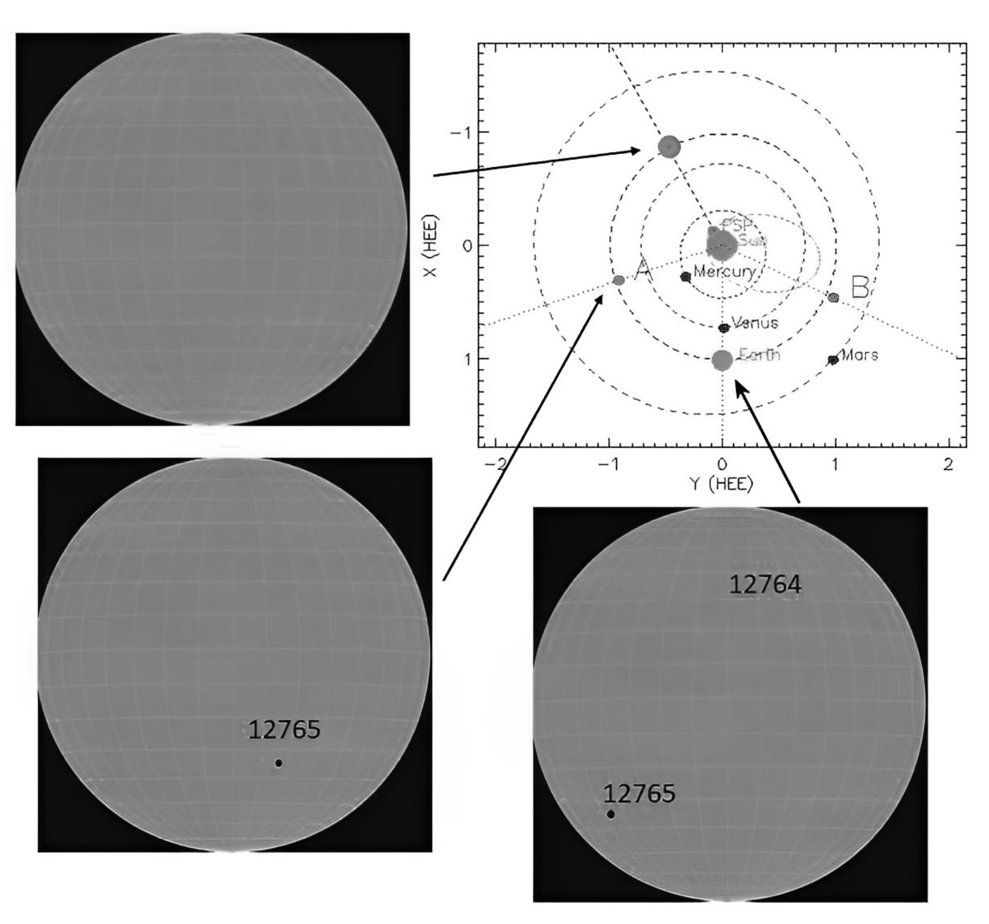


图 25 PSP、STEREO A和地球在2020年6月5日的位置图. 与空基和地基观测者对应的3个点的太阳光球视图也展示在本图中. 图片来自文献[49].

Fig. 25 Positions of PSP as well as STEREO A and Earth on June 5 2020. The solar photosphere view from three points corresponding space- and ground-based observers are also shown in the figure. This figure is from Ref. [49].

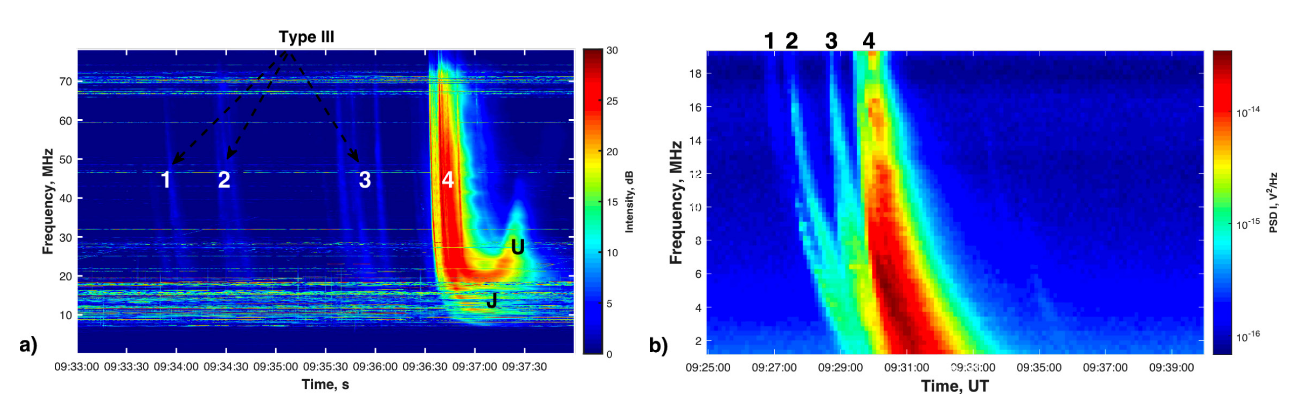


图 26 GURT (a)和PSP (b)在2020年6月5日观测的太阳射电爆发的动态频谱图. 图片来自文献[49].

Fig. 26 Dynamic spectra of solar radio bursts on June 5 2020 observed with GURT (a) and PSP (b). This figure is from Ref. [49].

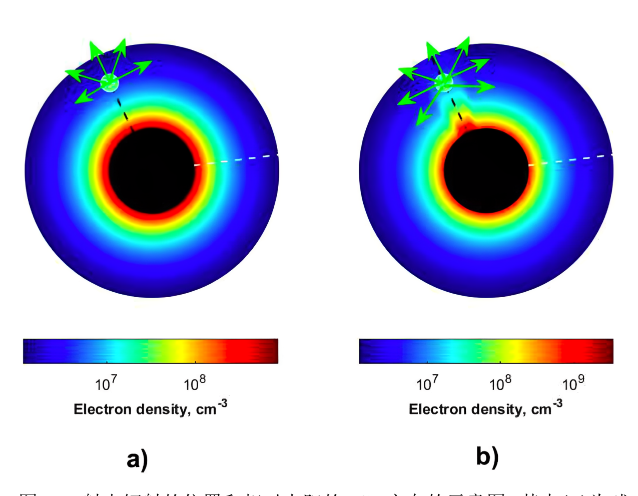


图 27　射电辐射的位置和相对太阳的PSP方向的示意图: 其中(a)为球对称日冕, (b)中日冕包括一个活动区(AR)引起的高密度区域. 图片来自文献[49].

Fig. 27　Sketch representing the radio emitter position and the direction to PSP with respect to the Sun: (a) spherically symmetric corona and (b) corona with a dense sector caused by AR. This figure is from Ref. [49].

4　总结与讨论

行星际III型暴的辐射频率较低, 被认为由行星际空间中的电子束流所激发. 抵近太阳观测的PSP将有可能接近行星际爆发的辐射源区. 自2018年8月发射以来, PSP在对低频射电波段的观测中发现了许多有关行星际III型暴的新现象和特征. 本文对目前为止使用PSP对行星际III型暴相关的研究进行了简要的介绍.

前两轨相遇模式的观测发现E01阶段少有爆发, 而E02则发现了大量的爆发. 第2轨近日点附近的III型暴在发生率和谱指数上表现出与4月中旬的噪暴具有明显不同的特征. 此外, 它们的圆偏振也具有显著的差异. 部分圆偏振既有可能是完全O模辐射的解偏振造成, 也可能是辐射最初就包含了O模和X模两种成分. 行星际III型暴的传播受到太阳风等离子体的散射影响, 其衰减时间完全可以用观测者与源之间的基频辐射的散射所解释, PSP观测密度扰动的结果与前人使用STEREO观测的预测保持一致. III型爆发的截止频率可能是由辐射机制的内在属性决定的, 辐射衰减使得在更近日心距离上可以观测到更多截止频率较高的弱爆发, 这很可能是PSP观测辐射截止频率与更远日心距离的探测器有所差异的主要原因. IIIb型射电爆发具有条纹状精细结构, 这可能为进一步理解辐射机制提供更为详细的信息; 基于电子回旋脉泽辐射机制, 普遍存在于太阳风中的阿尔文波可以调制产生具有条纹结构的生长率, 能够较好地解释PSP观测到的行星际IIIb型射电暴. 与PSP在E02期间观测的周期性爆发相关联的活动区的周期性研究揭示了无耀斑爆发期间存在非热电子加速的证据, 这种加速可能源于小的周期性事件. 通过EIS的多普勒频移和非热粒子速度的分布与线性无力场外推模型的对比研究发现, E02期间噪暴对应的源活动区应该为NOAA AR 12737, 而不是更大的AR 12738. PSP观测到日面背后活动区产生的III型爆发, 同时在地基GURT上观测到U+J+III型爆发, 分析认为太阳风电子密度的非球对称分布可能是使PSP能够观测到日面背后活动区产生III型暴的主要原因.

除上述提到的研究之外, 还有一些研究人员使用PSP的射电观测数据对高能粒子事件[50–51]、行星际日冕物质抛射[52]和准热噪声谱[53–54]等在RFS接收波段观测到的其他现象及其相关事件进行了研究, 对此本文不做赘述.

虽然PSP目前尚未抵达约10个太阳半径的日心距离, 但其前期的观测数据已经给我们提供了前所未有的丰富信息. 这其中抵近观测的重要性不言而喻, 而多位置和多波段的联合观测也起到了非常重要的作用. 未来, 随着PSP更加靠近太阳、接近行星际III型爆发的辐射源区, 更多关于辐射产生过程的细节信息也将逐渐被揭示.

参 考 文 献

[1] Sinclair R H A, Heather R. RAA, 2014, 14: 773
[2] Wild J P, McCready L L. AuSRA, 1950, 3: 387
[3] Zhang P J, Wang C B, Ye L. A&A, 2018, 618: A165
[4] Ginzburg V L, Zhelezniakov V V. SvA, 1958, 2: 653
[5] Melrose D B. SSRv, 1980, 26: 3
[6] Wu C S. ChSBu, 2012, 57: 1357
[7] Twiss R Q. AuJPh, 1958, 11: 564
[8] Schneider J. PhRvL, 1959, 2: 504
[9] Bougeret J L, Kaiser M L, Kellogg P J, et al. SSRv, 1995, 71: 231

[10] Bougeret J L, Goetz K, Kaiser M L, et al. SSRv, 2008, 136: 487
[11] Fox N J, Velli M C, Bale S D, et al. SSRv, 2016, 204: 7
[12] Maksimovic M, Bale S D, Chust T, et al. A&A, 2020, 642: A12
[13] Malaspina D M, Ergun R E, Bolton M, et al. JGRA, 2016, 121: 5088
[14] Pulupa M, Bale S D, Bonnell J W, et al. JGRA, 2017, 122: 2836
[15] Pulupa M, Bale S D, Badman S T, et al. ApJS, 2020, 246: 49
[16] Meyer-Vernet N, Claude P. JGRA, 1989, 94: 2405
[17] Malaspina D M, Goodrich K, Livi R, et al. GeoRL, 2020, 47: e2020GL090115
[18] Krupar V, Maksimovic M, Santolik O, et al. SoPh, 2014, 289: 3121
[19] Wheatland M S. ApJ, 2004, 609: 1134
[20] Eastwood J P, Wheatland M S, Hudson H S, et al. ApJ, 2010, 708: L95
[21] Fitzenreiter R J, Fainberg J, Bundy R B. SoPh, 1976, 46: 465
[22] Dulk G A, Suzuki S. A&A, 1980, 88: 203
[23] Krupar V, Maksimovic M, Kontar E P, et al. ApJ, 2018, 857: 82
[24] Krupar V, Szabo A, Maksimovic M, et al. ApJS, 2020, 246: 57
[25] Thejappa G, MacDowall R J, Kaiser M L. ApJ, 2007, 671: 894
[26] Wu C S, Reiner M J, Yoon P H, et al. ApJ, 2004, 605: 503
[27] Leblanc Y, Dulk G A, Hoang S. GeoRL, 1995, 22: 3429
[28] Dulk G A, Leblanc Y, Bougeret J L, et al. GeoRL, 1996, 23: 1203
[29] Ma B, Chen L, Wu D J, et al. ApJ, 2021, 913: L1
[30] Leblanc Y, Dulk G A, Hoang S, et al. A&A, 1996, 316: 406
[31] Ma B, Chen L, Wu D J, et al. ApJ, 2022, 932: L26
[32] Ellis G R A, McCulloch P M. Nature, 1966, 211: 1070
[33] Ellis G R A, McCulloch P M. AuJPh, 1967, 20: 583
[34] de la Noë J, Boischot A. A&A, 1972, 20: 55
[35] Chen X Y, Kontar E P, Yu S J, et al. ApJ, 2018, 856: 73
[36] Zhang P J, Zucca P, Sridhar S S, et al. A&A, 2020, 639: A115
[37] Takakura T, Yousef S. SoPh, 1975, 40: 421
[38] Smith R A, de La Noe J. ApJ, 1976, 207: 605
[39] Wang C B. ApJ, 2015, 806: 34
[40] Zhao G Q, Chen L, Wu D J. ApJ, 2013, 779: 31
[41] Chen L, Ma B, Wu D J, et al. ApJ, 2021, 915: L22
[42] Wu D J, Yang L. ApJ, 2007, 659: 1693
[43] Wu C S, Wang C B, Wu D J, et al. PhPl, 2012, 19: 082902
[44] Wu D J. PhPl, 2014, 21: 064506
[45] Chen L, Wu D J, Zhao G Q, et al. JGRA, 2017, 122: 35
[46] Cattell C, Glesener L, Leiran B, et al. A&A, 2021, 650: A6
[47] Harra L, Brooks D H, Bale S D, et al. A&A, 2021, 650: A7
[48] Reames D V. SSRv, 2018, 214: 61
[49] Stanislavsky A A, Bubnov I N, Koval A A, et al. A&A, 2022, 657: A21
[50] Mitchell J G, de Nolfo G A, Hill M E, et al. ApJ, 2020, 902: 20
[51] Cohen C M S, Christian E R, Cummings A C, et al. A&A, 2021, 650: A23
[52] Nieves-Chinchilla T, Alzate N, Cremades H, et al. ApJ, 2022, 930: 88
[53] Maksimovic M, Bale S D, Berčič L, et al. ApJS, 2020, 246: 62
[54] Martinović M M, Đor đević A R, Klein K G, et al. JGRA, 2022, 127: e2021JA030182

Research Progress on Interplanetary Type III Radio Bursts Based on PSP Observations

MA Bing[1,2] CHEN Ling[1,3] WU De-jin[1,3]
(1 Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210023)
(2 School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)
(3 Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026)

Abstract Compared to solar radio bursts, interplanetary (IP) radio bursts with lower radiation frequencies are generally believed to originate in the interplanetary space far from the low corona. The cutoff by Earth's ionosphere makes the ground-based observations for it impossible. Parker Solar Probe (PSP), launched by the National Aeronautics and Space Administration (NASA) to explore the Sun with the closer heliocentric distance than any previous spacecraft, provides an opportunity to study the low-frequency radio burst. The radio spectrometer it carries can observe radio radiation in the frequency range of 10 kHz–19.17 MHz. PSP can approach the radiation source region of the IP type III radio burst. Therefore, it has an unprecedented advantage to observe the interplanetary radio bursts. This paper reviews the studies about type III radio bursts observed by PSP so far. These studies include the occurrence rate, polarization, scattering, cutoff frequency, possible radiation mechanisms, and related radiation source regions of radio bursts and so on. Finally, future research prospects are discussed.

Key words Sun: activity, Sun: radio emission, Sun: corona, solar wind